

การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์
เป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต

นายมานิตย์ เชิดชูนคร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2552

**STUDY ON THE EFFICIENCY OF USING ROCK DUST
AND FLY ASH AS ADDITIVES TO
ASPHALT CONCRETE**

Manit Cherdchoonakhorn

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Degree of Master of Engineering in Transportation Engineering**

Suranaree University of Technology

Academic Year 2009

การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์
เป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รศ. ดร. วัฒนวงศ์ รัตนวราห)

ประธานกรรมการ

(ผศ. ดร. ธีรยุทธ ลิมานนท์)

กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร. บุญชัย แสงเพชรงาม)

กรรมการ

(ศ. ดร. ชูกิจ ลิ้มปิจำนงค์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ

(รศ. น.อ. ดร. วรพจน์ จำปาศ)

คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มานิตย์ เชิดชูนคร : การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต (STUDY ON THE EFFICIENCY OF USING ROCK

DUST AND FLY ASH AS ADDITIVES TO ASPHALT CONCRETE)

อาจารย์ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถิรยุทธ ลิมานนท์, 120 หน้า.

ปัจจุบันการเดินทางด้วยรถยนต์มีจำนวนมากขึ้น ทำให้ต้องมีการพัฒนาถนนให้สมบูรณ์อยู่เสมอ ผิวจราจรถือเป็นส่วนสำคัญในอันดับแรกที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมาก เพราะด้วยการทำงานที่มีอยู่ตลอด ทำให้ผิวจราจรมีการสึกหลอเร็วขึ้น เมื่อเป็นเช่นนั้นจะทำให้ถนนขรุขระและเกิดอุบัติเหตุทางถนนได้ง่าย และในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ในการก่อสร้างจำนวนมาก ทำให้ทรัพยากรบางประเภทลดน้อยลง ดังนั้นการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้จะเป็นการทดลองนำฝุ่นหินที่เหลือจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต และเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ยาง AC 60-70 เท่ากับ 4.0 4.5 5.0 5.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อได้ค่าเปอร์เซ็นต์ที่เหมาะสมแล้วจะทำการผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหินและเถ้าลอยซึ่งจะใช้ในการวิจัยครั้งนี้เท่ากับ 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบ จากนั้นจะดูความเหมาะสมของค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ยางกับ (1) ความหนาแน่น (2) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ (3) ค่าการไหล (4) เสถียรภาพ (5) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ และ (6) เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม ให้ตรงตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยจะใช้การทดลองด้วยวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐาน ASTM D1559-82 และทดสอบหาค่าโมดูลัสด้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

สาขาวิชา วิศวกรรมขนส่ง

ปีการศึกษา 2552

ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

MANIT CHERDCHOONAKHORN : STUDY ON THE EFFICIENCY OF
USING ROCK DUST AND FLY ASH AS ADDITIVES TO ASPHALT
CONCRETE. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. THIRAYOOT
LIMANOND, Ph.D., 120 PP.

MARSHAL'S/ INDIRECT TENSILE STIFFNESS MODULUS/ ROCK DUST/
FLY ASH

Nowadays, usage of automobile is rapidly increasing. Therefore, needs for developments of roadways are considered high priority. The primary concern is the surface of streets. Since it is used all time, the surface wears out very quickly causing potholes and roughness and, subsequently resulting accidents to occur very easily. Presently, many natural materials are being used in road constructions causing rapid decrement in such resources. This experiment uses rock dust left from asphalt concrete manufacturing and fly ash, by-product from burning of lignite from Mae Moh Power Plant, as additives to asphalt concrete compound. This research will use the AC 60-70 rubber in the amount of 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 and 6.0 percent by weight, respectively, as additive to the asphalt concrete compound. Then, when an appropriate percentage is obtained, No.1 Portland cement, rock dust and fly ash, in the amount of 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 and 5.0 percent, respectively, will be added using No. 1 Portland cement compound as reference. Finally, the study will observe which one of the values, resulted in graph showing the relation between percentages of rubber added and (1) Density, (2) %Air Voids, (3) Flow, (4) Stability, (5) %Voids Filled with Bitumen (VFB), and (6) %Voids in Mineral Aggregate (VMA). The experiment uses

Marshal's procedure under the ASTM D1559-82 standards and Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus.

School of Transportation Engineering

Academic Year 2009

Student's Signature _____

Advisor's Signature _____

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ บุคคลต่างๆ รวมไปถึงหน่วยงานราชการและเอกชน ที่ให้คำแนะนำ ปรีกษา และสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้โดยมี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถิรยุทธ ลิมานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ให้การอบรม แนะนำ ช่วยเหลือในการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนแนะนำการเขียนวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

รองศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์ รัตนวราห ประธานกรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ คำปรึกษา ชี้แนะแนวทางการเขียน และช่วยตรวจทานเนื้อหาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร.บุญชัย แสงเพชรงาม กรรมการ ที่กรุณาให้การแนะนำ และตรวจทานเนื้อหา วิทยานิพนธ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิรชร นกแก้ว อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้คำปรึกษาแนะนำการทดสอบ

อาจารย์ บุญพล มีไชโย อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมขนส่งและโครงสร้างพื้นฐาน มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวกในการทดสอบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

ขอขอบคุณส่วนวิเคราะห์และตรวจสอบทางวิศวกรรม กรมทางหลวงที่ 8 รวมไปถึง ข้าราชการประจำ ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และเครื่องมือทดสอบ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี รวมถึงบุคลากรประจำ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือ ในการใช้อุปกรณ์ และ เครื่องมือทดสอบ

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้การอุปการะอบรมเลี้ยงดู ตลอดจนให้ความรู้ ส่งเสริมการศึกษา และให้กำลังใจด้วยดีเสมอมา จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสร็จสมบูรณ์

มานิตย์ เชิดชูนคร

สารบัญ

หน้า

| | |
|---------------------------------|---|
| บทคัดย่อ (ภาษาไทย)..... | ก |
| บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)..... | ข |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ง |
| สารบัญ | จ |
| สารบัญตาราง | ซ |
| สารบัญรูป | ฅ |
| คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ | ฎ |
| บทที่ | |

| | |
|--|----|
| 1 บทนำ | 1 |
| 1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา | 1 |
| 1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย..... | 4 |
| 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย | 5 |
| 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ | 5 |
| 2 ปรีทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 6 |
| 2.1 คุณลักษณะแอสฟัลต์คอนกรีต | 6 |
| 2.2 คุณสมบัติสำคัญในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต | 8 |
| 2.3 การผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต | 12 |
| 2.4 วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler)..... | 13 |
| 2.5 ปรีทศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 15 |
| 2.6 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง | 28 |
| 3 วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 29 |
| 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย | 29 |
| 3.2 ทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์..... | 30 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | | |
|-------|--|----|
| 3.3 | ทดสอบวัสดุมวลรวม | 30 |
| 3.4 | แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic Concrete) | 32 |
| 3.5 | วัสดุผสมเพิ่ม | 33 |
| 3.6 | การวิเคราะห์ข้อมูล | 34 |
| 4 | ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล | 41 |
| 4.1 | ผลการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60-70) | 41 |
| 4.2 | ผลการทดสอบมวลรวม | 41 |
| 4.3 | ผลการทดสอบการเลือกปริมาณยางในแอสฟัลต์คอนกรีต | 43 |
| 4.4 | ผลการทดสอบวัสดุผสมเพิ่ม | 49 |
| 4.4.1 | ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ | 52 |
| 4.4.2 | ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหิน | 57 |
| 4.4.3 | ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ | 62 |
| 4.5 | ผลการทดสอบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม | 66 |
| 4.6 | ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของแอสฟัลต์คอนกรีตกับวัสดุผสมเพิ่มประเภทต่าง ๆ | 67 |
| 5 | บทสรุป | 69 |
| 5.1 | สรุปผลการวิจัย | 69 |
| 5.1.1 | ผลทดสอบมวลรวม | 69 |
| 5.1.2 | ผลทดสอบเลือกปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม ของแอสฟัลต์คอนกรีต | 69 |
| 5.1.3 | ผลทดสอบเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม | 70 |
| 5.1.4 | ผลทดสอบเลือกปริมาณฝุ่นหินที่เหมาะสม | 70 |
| 5.1.5 | ผลทดสอบเลือกปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม | 71 |
| 5.1.6 | สรุปผลทดสอบวัสดุผสมเพิ่ม | 71 |
| 5.2 | ข้อเสนอแนะ | 72 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|--|-----|
| รายการอ้างอิง | 74 |
| ภาคผนวก | |
| ภาคผนวก ก. ผลทดสอบ | 76 |
| ภาคผนวก ข. บทความผลงานวิจัยที่นำเสนอในการประชุมวิชาการ ขนส่งแห่งชาติ ครั้งที่ 6 | 113 |
| ประวัติผู้เขียน | 120 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 2.1 ผลการทดสอบแบบมาร์แชลล์ระหว่างหินฝุ่น ปูนขาวและซีเมนต์ (Tienfuan Kerh et al., 2005) | 19 |
| 2.2 ผลการทดสอบทางโครงสร้างฟิสิกส์ (Shaopeng Wu et al., 2006)..... | 20 |
| 2.3 ผลการทดสอบแบบมาร์แชลล์ (Shaopeng Wu et al., 2006)..... | 20 |
| 2.4 ผลทดสอบทางเคมีเถ้าลอยลิกไนต์ (Ratnasamy Muniandy et al., 2008) | 21 |
| 2.5 ผลทดสอบทางเคมีฝุ่นหินปูน (Ratnasamy Muniandy et al., 2008) | 21 |
| 2.6 ผลทดสอบทางเคมีผงเซรามิก (Ratnasamy Muniandy et al., 2008)..... | 22 |
| 2.7 ผลทดสอบทางเคมีตะกรันเหล็ก (Ratnasamy Muniandy et al., 2008)..... | 22 |
| 2.8 ผลทดสอบทางเคมีเถ้าลอยลิกไนต์ (Md. Jahir et al., 2006) | 25 |
| 2.9 ผลทดสอบกำลังอัดอายุ 3 7 และ 28 วัน (Md. Jahir et al., 2006)..... | 26 |
| 2.10 ขนาดผลตามอัตราส่วนระหว่างฝุ่นหินต่อยางแอสฟัลต์ (Mustafa and Serdal, 2005) | 27 |
| 4.1 ค่าความถ่วงจำเพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ | 41 |
| 4.2 ผลการทดสอบมวลรวม..... | 42 |
| 4.3 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์..... | 49 |
| 4.4 ผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ..... | 49 |
| 4.5 ผลทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง..... | 50 |
| 4.6 คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์..... | 50 |
| 4.7 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ในอัตราส่วน 2 เปอร์เซ็นต์ | 57 |
| 4.8 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินในอัตราส่วน 2.5 เปอร์เซ็นต์..... | 61 |
| 4.9 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วน 3.0 เปอร์เซ็นต์ | 65 |
| 4.10 เปรียบเทียบผลทดสอบการผสมเพิ่มของซีเมนต์ ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ | 67 |
| 4.11 เปรียบเทียบราคาต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (บาท) | 68 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|--------|--|
| 1.1 | แสดงการเป่าออกของฝุ่นหินจากกระบวนการผลิต 2 |
| 2.1 | ลักษณะก้อนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์ 6 |
| 2.2 | แสดงขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต 13 |
| 2.3 | ขั้นตอนการผสมใน โรงผสม (Plant Mix) 13 |
| 2.4 | ลักษณะฝุ่นหินที่กระจัดกระจายไปทั่วโรงผสม 14 |
| 2.5 | ลักษณะฝุ่นหินที่เหลือและกองเก็บเป็นจำนวนมาก 14 |
| 2.6 | เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพที่วัดจุดตัดแทรกต่าง ๆ (ชัยชาญ วรนิทัศน์, 2530) 16 |
| 2.7 | ผลทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแทนตะกรันหลักทั้งหมด (Meor Hamzah and Teoh Yi, 2008) 18 |
| 2.8 | ผลทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแทนตะกรันหลักและหินแกรนิตครึ่งหนึ่ง (Meor Hamzah and Teoh Yi, 2008) 18 |
| 2.9 | ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุต่างๆ(Hanifi Binici et al., 2007)..... 23 |
| 2.10 | ขนาดผลที่ใช้ทดสอบ (Saad and Haider, 2005) 24 |
| 2.11 | ผลทดสอบการหลุดลอกของส่วนผสมต่าง ๆ (Saad and Haider, 2005) 24 |
| 2.12 | ผลทดสอบค่าเสถียรภาพแบบมาร์แชลล์ (Mustafa and Serdal, 2005) 27 |
| 3.1 | สรุปขั้นตอนการทำวิจัย 29 |
| 3.2 | เครื่องมือทดสอบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม 34 |
| 3.3 | แสดงส่วนน้ำหนักราคเป็นร้อยละของมวลรวมและ ปริมาตรคิดเป็นร้อยละของปริมาตร 35 |
| 3.4 | แสดงลักษณะการทดสอบแบบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (ห้องทดสอบวัสดุการทางมหาวิทยาลัยนเรศวร) 40 |
| 4.1 | กราฟแสดงขนาดผลรวม 42 |
| 4.2 | ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ 43 |
| 4.3 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์..... 44 |
| 4.4 | ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์..... 45 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ | 46 |
| 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วย แอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ | 47 |
| 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับ เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ | 48 |
| 4.8 ลักษณะรูปร่างของซีเมนต์กำลังขยาย 1,100 เท่า | 51 |
| 4.9 ลักษณะรูปร่างของฝุ่นหินกำลังขยาย 1,100 เท่า | 51 |
| 4.10 ลักษณะรูปร่างของเม็ดลอยลิกไนต์กำลังขยาย 1,100 เท่า | 52 |
| 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ | 53 |
| 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ | 53 |
| 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ | 54 |
| 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ | 54 |
| 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วย แอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ | 55 |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับ เปอร์เซ็นต์ซีเมนต์ | 55 |
| 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน | 57 |
| 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน | 58 |
| 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน | 58 |
| 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน | 59 |
| 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับ เปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน | 59 |
| 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับ เปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน | 60 |
| 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์เม็ดลอยลิกไนต์ | 62 |

สารบัญรูป (ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์ | 62 |
| 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์ | 63 |
| 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์ | 63 |
| 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับ เปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์ | 64 |
| 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุรวมกับ เปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์ | 64 |
| 4.29 ผลทดสอบโมดูลัสด้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส | 66 |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

| | |
|----------|---|
| a | ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ผสม (เปอร์เซ็นต์โดยมวลของวัสดุรวม) |
| b | ปริมาณแอสฟัลต์ (เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์โดยมวลของวัสดุรวม) |
| c | ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลของแอสฟัลต์คอนกรีต) |
| D | เส้นผ่านศูนย์กลางก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต (มม.) |
| G_{ac} | ค่าความถ่วงจำเพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์ |
| G_{ag} | ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะมวลรวม |
| G_F | ความถ่วงจำเพาะวัสดุผสมแทรก |
| G_m | Theoretical Maximum Specific Gravity |
| G_v | ค่าความถ่วงจำเพาะโดยรวม |
| G_1 | ความถ่วงจำเพาะวัสดุรวมหินฝุ่น |
| G_2 | ความถ่วงจำเพาะวัสดุรวม3/8นิ้ว |
| G_3 | ความถ่วงจำเพาะวัสดุรวม1/2นิ้ว |
| G_4 | ความถ่วงจำเพาะวัสดุรวม3/4นิ้ว |
| i | ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีต (กรัมต่อมิลลิกรัม) |
| j | ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิผล (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต) |
| k | ปริมาตรของวัสดุรวม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต) |
| l | ปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุรวม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต) |
| L | แรงกระทำในแนวดิ่ง (นิวตัน) |
| m | ปริมาตรช่องว่างอากาศ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต) |
| P_F | ปริมาณวัสดุผสมแทรก (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุรวม) |
| P_1 | ปริมาณวัสดุรวมหินฝุ่น (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุรวม) |
| P_2 | ปริมาณวัสดุรวมหิน3/8นิ้ว (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุรวม) |
| P_3 | ปริมาณวัสดุรวม1/2นิ้ว (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุรวม) |
| P_4 | ปริมาณวัสดุรวม3/4นิ้ว (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุรวม) |
| R^2 | สัมประสิทธิ์การตัดสินใจการปรับแก้ |

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ (ต่อ)

| | |
|-----|---|
| T | ค่าเฉลี่ยความหนาแน่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต (มม.) |
| V | ค่าอัตราส่วน (Poisson's ratio) ของอนุหภูมิ |
| x | ปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม โดยมวลรวม (เปอร์เซ็นต์โดยมวลของวัสดุรวม) |
| y | ร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึม โดยมวลรวม |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ปัญหาที่ทำวิจัยและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยนิยมใช้ผิวจราจรแบบยึดหยุ่นบนเส้นทางสายหลักเพราะด้วยความสะดวกและต่อเนื่อง ทำให้กรมทางหลวงได้กำหนดมาตรฐานการก่อสร้างโดยคำนึงถึงปริมาณจราจรเฉลี่ยต่อวันตลอดปี (Average Annual Daily Traffic) เป็นข้อกำหนดการออกแบบ โดยส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตกรมทางหลวงได้ใช้การออกแบบโดยวิธีมาร์แชลล์ (มาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.604/2517) ซึ่งวัสดุสำคัญที่ใช้ในการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นจะมีอยู่ 2 ชนิดคือ ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ในประเทศไทยนิยมใช้ยางเกรด AC 60/70) และวัสดุผสมรวมตามขนาดที่กำหนด จากการออกแบบบางครั้งอาจต้องใช้วัสดุผสมเพิ่มมาเป็นส่วนผสมเพื่อปรับปรุงขนาดกะที่มีความหยาบให้มีความหนาแน่นมากขึ้นและยังช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงและทนทานมากขึ้นด้วย โดยปัจจุบันได้มีการศึกษาการนำวัสดุเหลือทิ้งต่าง ๆ มาใช้เป็นวัสดุผสมเพิ่มอย่างกว้างขวางเพื่อเป็นการลดจำนวนและนำมาใช้ได้อย่างเหมาะสม ดังนั้นจึงกำหนดมาตรฐานให้อยู่ในจำพวกวัสดุปอซโซลาน (ASTM C618) จากวัสดุเหล่านี้ส่วนใหญ่จะเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่ได้จากกระบวนการเผาไหม้ที่มีความร้อนสูง ทำให้มีขนาดเล็ก จึงเหมาะสม ดังนั้นการนำวัสดุเหล่านี้มาใช้จะต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าของการก่อสร้างด้วย ซึ่งการวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้ (1) ฝุ่นหิน (มีอยู่ในโรงผสมสามารถนำกลับมาใช้ได้สะดวก) และ (2) เถ้าลอยลิกไนต์ (ปัจจุบันมีการนำมาใช้ในงานคอนกรีตอย่างแพร่หลายทำให้สามารถหาซื้อได้ง่าย) มาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม โดยสามารถทราบถึงปัญหาและสาเหตุได้ดังต่อไปนี้

1) ฝุ่นหิน (Rock Dust) เป็นวัสดุที่ได้จากการเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) แบบร้อน (Hot Mix) โดยการผลิตนั้นจะมีวัสดุผสมรวมในขนาดกะต่าง ๆ ได้แก่ หิน 3/4" หิน 1/2" หิน 3/8" และหินฝุ่น ซึ่งหินในขนาดต่าง ๆ เหล่านี้จะได้จากการระเบิด และคัดหินให้มีขนาดตามต้องการ จากนั้นจะทำการขนย้ายหินมาตามสถานที่ผลิตต่าง ๆ ทำให้เกิดการขัดสีกันระหว่างขนส่งจึงเกิดหินฝุ่นเป็นจำนวนมาก ดังนั้นเมื่อนำหินขนาดต่าง ๆ มาเผาและนำไปอยู่ในยูนิตร้อนโดยผ่านตะแกรงตามการออกแบบเพื่อผสม จะต้องทำการเป่าฝุ่นหินที่มีจำนวนมากออกทิ้งไป ดังรูปที่ 1.1 ทำให้มีปริมาณฝุ่นหินจำนวนมากและเป็นอันตรายต่อผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นจึงได้มีการนำฝุ่นหินที่เหลือทิ้งมาผสมในดินเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้น และยัง

นำมาเป็นส่วนผสมในหินคลุกของชั้นรองผิวทางด้วย ถึงแม้ว่าได้มีการนำมาเป็นวัสดุผสมต่างๆแล้ว ก็ยังเหลือฝุ่นหินอีกจำนวนมากอยู่ จึงมีแนวคิดที่จะนำฝุ่นหินเหล่านี้มาใช้ในการผสมเพิ่มกับ แอสฟัลต์คอนกรีต เพราะด้วยปริมาณและสถานที่จะสามารถลดค่าใช้จ่ายในการขนส่งลงไปได้



รูปที่ 1.1 แสดงการเป่าออกของฝุ่นหินจากกระบวนการผลิต

2) เถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง โดยการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้ถ่านหินลิกไนต์ไม่น้อยกว่าวันละ 40,000 ตัน จากจำนวนถ่านหินที่ใช้ในปริมาณที่มากทำให้เหลือเถ้าลอยลิกไนต์จากกระบวนการเผาไหม้ประมาณวันละ 8,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะต้องกำจัดทิ้ง แต่ด้วยปริมาณที่มากทำให้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตต้องศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น และความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าลอยลิกไนต์กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง ด้วยคุณลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดเล็กกว่าปูนซีเมนต์ มีรูปร่างทรงกลมขนาดตั้งแต่ 1 ไมโครเมตร (0.001 มิลลิเมตร) จนถึง 150 ไมโครเมตร (0.15 มิลลิเมตร) ค่าความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.00 - 2.60 จากคุณสมบัติดังกล่าวแล้ว ยังมีการศึกษาทางด้านเคมีเพื่อเป็นเกณฑ์การจำแนกชนิดของเถ้าลอยลิกไนต์ โดยส่วนประกอบทางเคมีที่สำคัญจะประกอบไปด้วยสารซิลิกา (SiO_2) อลูมินา (Al_2O_3) และ เฟอริกออกไซด์ (Fe_2O_3) โดยอัตราส่วนของออกไซด์ทั้ง 3 ชนิดนี้จะสามารถแปรเปลี่ยนไปตามอุณหภูมิ ชนิด และสภาพแวดล้อมขณะทำการเผา ซึ่งปัจจุบัน กฟผ. ได้ทำการควบคุมส่วนผสมต่าง ๆ ให้อยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมให้อยู่ตามมาตรฐาน ASTM C 618 “Specification for Fly ash and Raw or Calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete” ดังนั้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา กฟผ. ได้นำเถ้าลอย

ลิกไนต์โรงไฟฟ้าแม่เมาะไปใช้ในงานก่อสร้างต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นวัสดุถมสำหรับงานก่อสร้าง การใช้ปรับปรุงแทนดินหรือแม้แต่งานซ่อมแซมต่าง ๆ ซึ่งในการศึกษาการผสมเพิ่มด้วยถ้ำลอยลิกไนต์ มีการศึกษาอย่างกว้างขวางและต่อเนื่องจากไฟฟ้าฝ่ายผลิต ด้วยคุณสมบัติที่ดีบางประการทำให้ถ้ำลอยลิกไนต์มีการนำมาใช้ในกระบวนการก่อสร้างต่าง ๆ มากมายไม่ว่าจะเป็นในการผสมคอนกรีต เพื่อลดปริมาณซีเมนต์ลงให้มีราคาที่ประหยัดและมีคุณสมบัติเหมือนเดิมหรือดีขึ้น หรือแม้แต่ใช้กับการก่อสร้างถนนไม่ว่าจะเป็นปรับปรุงคุณภาพของดินรวมไปถึงการผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย

เพื่อลดปัญหาของฝุ่นหินและถ้ำลอยลิกไนต์ที่เป็นอันตรายต่อร่างกายมนุษย์โดยการศึกษาของกระทรวงสาธารณสุขพบว่า เมื่อหายใจเอาฝุ่นหินหรือถ้ำลอยลิกไนต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนเป็นระยะเวลานาน และมีการสะสมของฝุ่นในปอด จะเกิดโรคต่าง ๆ ได้แก่ (1) โรคปอดหิน (Silicosis) ถือเป็นโรคที่เกิดขึ้นมานานและมีอันตรายอย่างมากโดยโรคนี้ไม่สามารถรักษาได้ นอกจากการป้องกันโรคอื่นเข้ามาแทรกซ้อน เมื่อหายใจเข้าสู่ร่างกายจะมีอันตราย เพราะร่างกายไม่สามารถกรองหรือขับออกจากร่างกายได้ โดยเฉพาะฝุ่นที่มีส่วนผสมของสารซิลิกา เมื่อสูดเข้าไปเป็นระยะเวลานาน ฝุ่นเหล่านี้จะเข้าไปจับที่บริเวณปอด จนทำให้ปอดแข็ง ไม่สามารถขยายตัวรับออกซิเจนได้ ซึ่งระยะแรกจะไม่แสดงอาการ เมื่อสะสมมาก ๆ จึงจะแสดงอาการ และเมื่อโรคแสดงอาการแล้ว ส่วนใหญ่จะรักษาไม่ได้ โดยผู้ป่วยจะเหนื่อย หอบง่าย ผอม การแลกเปลี่ยนออกซิเจนของปอดทำได้ไม่ดี ทำให้ร่างกายซิด จนถึงขั้นทำงานไม่ได้ และจะทำให้ ภาวะหายใจล้มเหลว และเป็นอันตรายถึงชีวิต สำหรับประเทศไทยพบว่ามีผู้ป่วยโรคปอดหินครั้งแรกที่จังหวัดกาญจนบุรี เมื่อ พ.ศ. 2497 และพบว่ามีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ โดยในปีพ.ศ. 2541 พบว่ามีผู้เสี่ยงต่อการเกิดโรคประมาณ 221,796 คน และได้ทำการการตรวจสุขภาพพบผู้มีอาการใกล้เคียงโรคปอดหินจำนวน 169 คน จากผู้เข้าตรวจ 8,146 คน สำหรับจังหวัดนครราชสีมา ในปีพ.ศ. 2548 พบผู้ป่วย จำนวน 11 ราย ปีพ.ศ. 2549 พบผู้ป่วย 3 ราย และปีพ.ศ. 2550 พบผู้ป่วย 8 ราย คิดเป็นอัตรา 0.43 0.10 และ 0.30 ต่อประชากรแสนคนตามลำดับ และพบผู้เสียชีวิตแล้ว 1 รายซึ่งประกอบอาชีพทำหินทรายขัดในอำเภอสีคิ้ว จังหวัดนครราชสีมา (2) โรคปอดจากฝุ่นหินแบบอื่น ๆ (Pneumoconiosis, other) เป็นโรคปอดอักเสบที่เกิดจากการหายใจเอาฝุ่นเล็ก ๆ โดยเฉพาะในบริเวณทำงานเข้าไปสะสมในส่วนถุงลมปอด พังผืดหุ้มล้อมฝุ่น มีผลให้เนื้อปอดถูกทำลายและสมรรถภาพการทำงานของปอดเสื่อมลงเรื่อย ๆ จนเกิด อาการต่าง ๆ ของระบบทางเดินหายใจขึ้น สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2546 ได้พบผู้ป่วยจำนวน 130 ราย คิดเป็นอัตรา 0.22 ต่อประชากรแสนคน แต่ไม่พบผู้เสียชีวิต ซึ่งอัตราผู้ป่วยสูงที่สุดได้แก่ ภาคกลาง เท่ากับ 0.30 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภาคเหนือ และภาคใต้ เท่ากับ 0.24 0.08 และ 0.06 ต่อประชากรแสนคน ตามลำดับ ซึ่งจังหวัดที่มีอัตราผู้ป่วยมากที่สุดได้แก่ สมุทรสาคร อัตราป่วย 11.00 ต่อประชากรแสนคน รองลงมาได้แก่ ศรีสะเกษ

ระยอง อำนาจเจริญ และอุบลราชธานี อัตราผู้ป่วยเท่ากับ 1.09 1.08 1.08 และ 0.78 ต่อประชากรแสนคน (3) โรคหอบหืดเรื้อรัง (Pulmonary disease, chronic obstructive) เป็นโรคที่มีการอุดกั้นของหลอดลมเกิดขึ้นอย่างถาวรเนื่องจากการอักเสบเรื้อรัง โรคนี้เมื่อเป็นแล้วสภาพที่เปลี่ยนแปลงในปอดมักจะไม่ได้ดีขึ้นหรือดีขึ้นเล็กน้อยแต่ก็เพียงชั่วคราวต่อไปจะมีแต่แย่ลงทำให้ผู้ป่วยหายใจลำบากมากขึ้น จนถึงภาวะการหายใจล้มเหลวและถึงตายได้เป็นต้น ดังนั้นการใช้วัสดุเหลือทิ้งเป็นการช่วยลดจำนวนลงและยังเป็นผลดีต่อสุขภาพ

แต่ด้วยคุณสมบัติของฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ที่สามารถนำไปผสมในดินจะช่วยปรับปรุงดินที่มีสภาพไม่ดีเท่าที่ควรให้กลับมาดีขึ้นได้ ทำให้ผู้วิจัยได้เลือกที่จะนำมาผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต เพื่อเพิ่มคุณสมบัติให้ดีขึ้นกัน ถึงแม้ว่าจะมีการนำฝุ่นหินมาผสมแอสฟัลต์คอนกรีตอย่างแพร่หลาย แต่ยังไม่มีการทดลองวิจัยอย่างจริงจังว่าฝุ่นหินจะช่วยปรับปรุงคุณภาพหรือไม่ และจะใช้ผสมในอัตราส่วนเท่าใดที่จะเหมาะสม ส่วนการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นจะมีราคาที่สูงเป็นพิเศษเพราะด้วยอุปกรณ์เครื่องจักรและวิธีการก่อสร้างทำให้ต้นทุนมีราคาสูง รวมไปถึงการขนส่งมวลรวมต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ทำให้ผู้วิจัยเลือกใช้ฝุ่นหินเพราะได้มาจากโรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ส่วนเถ้าลอยลิกไนต์สามารถหาซื้อได้ง่ายและมีราคาถูกเพราะมีการนำมาใช้เป็นส่วนผสมเพิ่มในคอนกรีตอย่างแพร่หลาย กระทั่งในอดีตจนถึงปัจจุบันกรมทางหลวงได้นำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งมาผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อเพิ่มความสามารถต่าง ๆ ให้ดีขึ้นเหมาะกับชั้นทาง ที่กำหนด ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงได้นำแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบกับการผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ว่าจะสามารถปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาให้ดีขึ้นได้หรือไม่
- 2) เพื่อศึกษาเปรียบเทียบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์กับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง
- 3) เพื่อศึกษาแนวทางในการออกแบบผิวทาง สำหรับงานผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ส่วนผสมของฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ ในปริมาณที่พอเหมาะเพื่อขจัดปัญหาหลุมลพิษและทรัพยากรทางธรรมชาติที่นำมาใช้อย่างเหมาะสม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

เป็นการนำเถ้าลอยลิกไนต์ และฝุ่นหินมาทำการออกแบบเพื่อดูอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมสำหรับการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต โดยจะแบ่งหัวข้อการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

- 1) ใช้หินและฝุ่นหินที่เหลือจากระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่นำหินมาจากโรงโม่หิน ตำบลหนองน้ำแดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา
- 2) ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่นำมาจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง
- 3) ปริมาณยางแอสฟัลต์ AC 60 - 70 ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 4.0 4.5 5.0 5.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม โดยเลือกปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมมาใช้
- 4) ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมจากแอสฟัลต์คอนกรีตจากนั้นใช้วัสดุผสมเพิ่มได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ สำหรับการทดลองนี้เท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม
- 5) ทำการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์ โดยเลือกใช้ปริมาณการจราจรชนิดหนาแน่นและชั้นทาง Wearing Course
- 6) เมื่อได้ปริมาณการผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดสอบเพิ่มด้วยค่าโมดูลัสด้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้จะมีประโยชน์ต่อหน่วยงานของกรมทางหลวงรวมทั้งหน่วยงานของเอกชน ที่จะสามารถนำผลวิจัยที่ได้ไปออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมต่อสถานที่และสภาพของการปฏิบัติงาน ช่วยประหยัดค่าใช้จ่าย โดยยังคงความแข็งแรงทนทานตามมาตรฐานกรมทางหลวง ขณะเดียวกันสามารถช่วยลดปัญหาทางด้านมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมลงได้ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- 1) สามารถช่วยประหยัดค่าใช้จ่ายลงเมื่อนำมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต เพราะสามารถลดต้นทุนในการขนส่งและกำจัดทิ้งลงได้
- 2) เพื่อเป็นการช่วยยืดอายุการใช้งานของถนนให้มีความแข็งแรงมากขึ้นเพราะเป็นวัสดุช่วยลดประสานช่องว่างที่เกิดขึ้นในแอสฟัลต์คอนกรีต
- 3) สามารถช่วยลดมลพิษทางอากาศที่เกิดจากฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม

บทที่ 2

ปรัทศน์วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอนและลักษณะการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตรวมทั้งการนำฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์มาเป็นส่วนผสมเพิ่ม พร้อมกับทบทวนการศึกษาที่เกี่ยวข้องในอดีต

2.1 คุณสมบัติแอสฟัลต์คอนกรีต

แอสฟัลต์คอนกรีต เป็นวัสดุที่ใช้ทำผิวจราจรที่มีความยืดหยุ่นหรือพื้นทางที่บดอัดแน่น ที่ได้จากส่วนผสมระหว่างวัสดุมวลรวม (Aggregate) กับ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ตามอัตราส่วนที่ออกแบบ ซึ่งจะต้องได้อุณหภูมิตรงตามข้อกำหนดของการผสมและการบดอัด



รูปที่ 2.1 ลักษณะก้อนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ออกแบบด้วยวิธีมาร์แชลล์

คุณสมบัติที่สำคัญของแอสฟัลต์คอนกรีต

1) ความหนาแน่น (Density) เป็นปริมาณมวลของแอสฟัลต์คอนกรีตต่อหนึ่งหน่วยปริมาตร เป็นค่าที่สำคัญสำหรับแอสฟัลต์คอนกรีต เพราะเมื่อแอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่น

มากพอ จะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรง คงทนและมีอายุการใช้งานที่นานขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการบดอัดนั้นต้องเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงที่กำหนด ซึ่งการบดอัดในสนามจะมีความหนาแน่นน้อยกว่าในห้องทดลอง ดังนั้นกรมทางหลวงจึงกำหนดให้มีการบดอัดต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 98 ของความหนาแน่นที่ได้จากห้องทดลอง

2) ช่องว่างอากาศ (Air Voids) สำหรับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นจะต้องมีช่องว่างอากาศที่เพียงพอตามที่กำหนดในการออกแบบ ซึ่งระหว่างเม็ดวัสดุมวลรวมที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์จะมีช่องว่างเล็ก ๆ เรียกว่า ช่องว่างอากาศ และช่องว่างอากาศนี้ต้องไม่ควรมากจนเกินไป เพราะเมื่อเปิดการจราจรแล้ว รถที่แล่นผ่านบนถนนผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีการอัดแน่นอีกครั้ง จนทำให้อัตราส่วนช่องว่างอากาศลดลง เพราะถ้าปริมาณช่องว่างอากาศมีน้อยเกินไปหลังการบดอัดเสร็จ จะมีความร้อนของถนน จนทำให้ไม่มีช่องว่างให้แอสฟัลต์ขยายตัวได้เพียงพอจะทำให้ผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตเกิดการเยิ้ม (Bleeding) ดังนั้นจึงมีการกำหนดให้ปริมาณช่องว่างอากาศอยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณและน้ำหนักของรถที่แล่นผ่านด้วย การที่แอสฟัลต์คอนกรีตมีความหนาแน่นมากพอจะทำให้ผิวถนนมีความแข็งแรงเพราะจะทำให้อากาศและน้ำไม่สามารถซึมผ่านไปในผิวถนน จนไปทำลายแอสฟัลต์และการยึดเกาะระหว่างมวลรวมได้ แต่อย่างไรก็ตาม การที่มีความหนาแน่นมากเกินไปจะต้องคำนึงถึงช่องว่างอากาศด้วยเพราะค่าที่ได้ นั้นจะมีค่าที่กลับกันโดยสิ้นเชิง เพราะถ้ามีความหนาแน่นมากจะทำให้ช่องว่างอากาศลดลงด้วยเช่นเดียวกัน

3) ช่องว่างระหว่างมวลรวม (Voids in Mineral Aggregate, VMA) เป็นค่าปริมาณช่องว่างทั้งหมดที่มีอยู่ระหว่างเม็ดของวัสดุมวลรวมในแอสฟัลต์คอนกรีตที่บดทับแล้วซึ่งรวมช่องว่างอากาศที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (Voids Filled with Bitumen, VFB) หรือเรียกว่าปริมาณช่องว่างสำหรับปริมาณของแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (Effective Asphalt) ดังนั้นถ้าหากเปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณช่องว่างอากาศเท่ากันแล้ว แอสฟัลต์คอนกรีตที่มี VMA สูงกว่าย่อมมีความคงทนมากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มี VMA น้อยกว่า เพราะด้วยเหตุผลที่ว่า การที่มีช่องว่างระหว่างมวลรวมมากจะทำให้ฟิล์มแอสฟัลต์สามารถเคลือบผิวมวลรวมได้หนามากเช่นกัน จึงทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความคงทนต่ออายุการใช้งานมากขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการที่มีค่า VMA น้อยก็จะทำให้ประหยัดแอสฟัลต์ซีเมนต์มากขึ้นแต่ก็ไม่ควรน้อยกว่าค่าที่กำหนดเพราะจะทำให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความคงทนน้อยลง

4) ปริมาณแอสฟัลต์ (Asphalt Content) มีความสำคัญอย่างมากต่อคุณสมบัติที่ดีของแอสฟัลต์คอนกรีต ดังนั้นการที่จะเลือกปริมาณแอสฟัลต์ที่เหมาะสมจะต้องออกแบบตามเงื่อนไข (Design Criteria) ที่กำหนด รวมไปถึงการออกแบบในห้องทดลองหรือแม้แต่โรงผสม (Mixing

Plant) การที่จะได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีต้นทุนน้อย จะต้องดูขนาดกะ (Gradation) และคุณสมบัติ การดูดซึมแอสฟัลต์ของมวลรวมด้วย เนื่องจากค่าที่ได้จะมีผลโดยตรงต่อการเลือกปริมาณแอสฟัลต์ โดยถ้าหากขนาดกะมีเม็ดวัสดุเล็กและละเอียดมากจะทำให้ใช้แอสฟัลต์มาก เพราะพื้นผิวของเม็ด วัสดุเล็กและละเอียดจะดูดซึมแอสฟัลต์มากกว่าเม็ดวัสดุที่มีขนาดใหญ่กว่า (เมื่อปริมาตรเท่ากัน) จึง ต้องใช้แอสฟัลต์มากกว่าในการเคลือบผิววัสดุมวลรวม ส่วนวัสดุมวลรวมที่ดูดซึมแอสฟัลต์มากก็ จะต้องใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในส่วนผสมมากขึ้นเช่นกัน

2.2 คุณสมบัติสำคัญในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นยังจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติอีกหลายประการเพราะด้วย ผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตที่จะต้องทนต่อการรับน้ำหนักที่เกิดจากการจราจร การเปลี่ยนแปลง อุณหภูมิรวมไปถึงปริมาณน้ำที่มีตามฤดูกาล เป็นต้น ดังนั้นผู้ออกแบบต้องมีการพิจารณาและ เข้าใจถึงสภาพทั่วไปของพื้นที่ ๆ ต้องออกแบบด้วย คุณสมบัติสำคัญในการออกแบบแอสฟัลต์ คอนกรีตได้แก่

1) เสถียรภาพ (Stability) เป็นความสามารถในการรับน้ำหนักจากการจราจรโดยไม่เกิด ร่องล้อหรือการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง (Deformation) ความต้านทานต่อการเปลี่ยนรูปร่างนั้น เป็นผลมา จากคุณสมบัติของมวลรวม เช่นลักษณะรูปร่างของเม็ดวัสดุ ความเรียบ ความหยาบ หรือความ ขรุขระของผิววัสดุมวลรวม ส่วนแรงยึดเกาะเป็นผลมาจากแอสฟัลต์ที่ต้องมีความสามารถในการยึด ให้มวลรวมติดกัน เพื่อป้องกันการเคลื่อนตัวของวัสดุมวลรวมเมื่อมีน้ำหนักรถมากระทำ แต่อย่างไรก็ ตามการที่มีแอสฟัลต์มากเกินไปจะทำให้เกิดการเคลื่อนตัวได้ง่ายจึงต้องออกแบบให้เหมาะสมต่อ การใช้งาน ซึ่งการออกแบบส่วนผสมที่ดีนั้น ค่าเสถียรภาพต้องไม่สูงมากเกินไปเพราะค่าที่สูงมาก จะทำให้ขาดความยืดหยุ่นจนทำให้ผิวจราจรเสียหายได้ง่าย โดยเฉพาะการปูทับบนถนนที่มีการแอ่น ตัว (Deflection) สูงยังรวมไปถึงการที่มีส่วนผสมแอสฟัลต์มากเกินไปจนทำให้เกิดคลื่นลูกกระนาบ เกิดร่องล้อ และการเอียงของผิว การที่วัสดุมวลรวมมีลักษณะกลม ผิวเรียบทำให้ขยับตัวได้ง่าย จน เกิดร่องล้อได้เช่นเดียวกัน

2) ความคงทน (Durability) เป็นการต้านทานต่อการเสื่อมสภาพ ซึ่งอาจมีสาเหตุหลัก ๆ อยู่ 2 ประการ คือเกิดจากอากาศและน้ำที่ไปทำลายฟิล์มที่ยึดเกาะระหว่างมวลรวมจนทำให้เกิดการ เสื่อมสภาพและแตกตัว (Disintegration) ซึ่งความคงทนนั้นอาจจะต้องดูค่าต่าง ๆ เพิ่มเติมได้แก่ การ ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ให้มากที่สุดที่จะทำได้ เพราะตัวแอสฟัลต์จะมีฟิล์มเป็นตัวเคลือบวัสดุมวลรวม เมื่อแอสฟัลต์ยังหนาจะทำให้อากาศและน้ำไปทำลายวัสดุมวลรวมได้ยาก การเลือกขนาดกะที่มี ลักษณะแน่น (Dense Gradation) จะช่วยให้อากาศและน้ำซึมผ่านได้ยากและยังมียุทธศาสตร์การยึด เกาะที่ดีไม่ทำให้หินหลุด (Raveling) ในสภาวะการใช้ถนนที่มีความเปียก และการออกแบบ

ส่วนผสมรวมทั้งการบดอัดในสนาม ในลักษณะที่ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่กั้นน้ำและอากาศผ่านได้ยากที่สุด (Maximum Impermeability)

สาเหตุหลัก ๆ ของการขาดความคงทนอาจเกิดจาก การที่มีปริมาณแอสฟัลต์น้อยเกินไป ทำให้หินมีลักษณะแห้งและหลุดได้ง่าย การที่มีช่องว่างอากาศมากเกินไปซึ่งเกิดจากการออกแบบส่วนผสมและการบดอัดที่ไม่ดีจนทำให้เกิดรอยแตก และคุณสมบัติการยึดเกาะที่ไม่ดีในสภาวะที่เปียกน้ำ จนทำให้ฟิล์มที่เคลือบวัสดุรวมหลุดออกทำให้หินหลุดหรือเกิดการหินโผล่

3) ความต้านทานต่อการซึมผ่านของอากาศและน้ำ (Impermeability) การที่มีค่าปริมาณช่องว่างอากาศมากเกินไปจะทำให้อากาศและน้ำสามารถซึมผ่านได้ง่าย แต่ที่มีความสำคัญไม่แพ้กันคือขนาดช่องว่างของแต่ละช่อง ช่องว่างทะลุติดต่อกันหรือไม่ และช่องว่างทะลุถึงผิวนอกของแอสฟัลต์คอนกรีตหรือไม่ ถึงอย่างไรก็ตามอากาศและน้ำสามารถซึมผ่านได้ แต่ก็ควรให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด

สาเหตุหลัก ๆ ที่ทำให้เกิดการซึมผ่านของอากาศและน้ำ อาจเกิดจากการที่มีแอสฟัลต์น้อยเกินไป รวมไปถึงการออกแบบให้มีช่องว่างอากาศมากเกินไป

4) ความง่ายในการปูและบดอัด (Workability) ความง่ายในการปูและบดอัดนั้นสามารถแก้ไขได้โดยการออกแบบหรือเปลี่ยนวัสดุใหม่ ซึ่งสาเหตุหลัก ๆ อาจเกิดจากการที่มีวัสดุรวมโตและหยาบที่มากเกินไปทำให้บดอัดยาก อุณหภูมิขณะผสมต่ำทำให้แอสฟัลต์ไม่สามารถเคลือบผิววัสดุได้หมด การใช้ทรายที่มีขนาดกลางมากเกินไปจนเกิดการอ่อนตัวได้ง่ายขณะบดอัด และการที่มีปริมาณวัสดุผสมแตรกมากและน้อยเกินไปจนเกิดการที่มีลักษณะอ่อน แห้ง หรือเหนียวจนทำงานได้ยากและไม่คงทน

5) ความสามารถในการแอ่นตัว (Flexibility) การที่มีผิวจราจรที่คงทนไม่แตกง่ายถือเป็นสิ่งที่ต้องการในการออกแบบผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการแอ่นตัวสามารถเกิดได้จากการรับน้ำหนักของถนนและการขยายตัวตลอดเวลาของชั้นดินด้านล่าง ในการที่จะได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่แอ่นตัวได้ดีขึ้นอยู่กับชนิดที่เรียงขนาดโปร่งมากกว่าขนาดแน่น แต่ต้องระวังให้มากเพราะการที่มีขนาดโปร่งมากจะทำให้มีค่าเสถียรภาพต่ำ

6) ความต้านทานต่อการล้า (Fatigue Resistance) เป็นความสามารถของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีความต้านทานต่อการดัดโค้งแบบซ้ำซาก (Repeated Bending) ซึ่งเกิดจากการกระทำของน้ำหนักล้อ ในปริมาตรช่องว่างอากาศจะมีผลต่อปริมาณแอสฟัลต์และความหนืดของแอสฟัลต์ มีผลต่อการต้านทานการล้าด้วย เนื่องมาจากการที่มีช่องว่างอากาศมากหรือบดอัดไม่เพียงพอจะทำให้มีผลต่อการต้านทานการล้าลดลง ในทำนองเดียวกันหากแอสฟัลต์มีการเสื่อมสภาพจะมีผลต่อการต้านทานการล้าเช่นเดียวกัน นอกจากนั้นความหนาและความแข็งแรงของชั้นผิวทางตลอดจน

ความแข็งแรงของชั้นโครงสร้างที่รองรับผิวทางก็มีผลต่ออายุและการป้องกันการเกิดรอยแตก เพราะจะเป็นตัวช่วยในการรับน้ำหนักของล้อที่กระทำซ้ำ ๆ กันได้นานขึ้น

สาเหตุหลัก ๆ อาจเกิดจากการที่ส่วนผสมมีปริมาณแอสฟัลต์น้อยเกินไป ทำให้เกิดรอยแตกได้ง่าย การที่ออกแบบให้มีช่องว่างอากาศมากเกินไปและการบดอัดที่ไม่เพียงพอจะทำให้เสื่อมสภาพ และเกิดรอยแตก รวมไปถึงการที่ผิวทางหนาไม่เพียงพอจนทำให้เกิดการแอ่นตัว และมีรอยแตกได้ง่ายเช่นกัน

7) ความต้านทานต่อการลื่นไถล (Skid Resistance) การที่ผิวจราจรมีการลื่นไถลจะทำให้มีอันตรายอย่างมากต่อการใช้ถนน เพราะจะทำให้ล้อรถไม่สามารถยึดเกาะได้ดี ซึ่งสาเหตุสำคัญอาจเกิดมาจาก การที่มีแอสฟัลต์มากเกินไปจนเกิดการเยิ้ม หรือแม้แต่นาฬิกาและลักษณะผิวของวัสดุผสมรวมไม่เหมาะสม จนทำให้ผิวมีลักษณะเรียบจึงเกิดการลื่นไถลได้ง่ายเมื่อมีน้ำท่วมผิวจราจร

วัสดุที่ใช้ผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตมีอยู่ด้วยกันหลัก ๆ คือ แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) และมวลรวม (Aggregate) ซึ่งวัสดุที่ใช้ผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตต้องทดสอบให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นจึงสามารถแยกเป็นหัวข้อได้ดังนี้

1) แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Cement) ปัจจุบันกรมทางหลวงได้กำหนดให้ใช้ แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด 60 - 70 ซึ่งจะเหมาะสมมากที่สุดสำหรับอุณหภูมิของประเทศไทย โดยมีการทดสอบดังต่อไปนี้

- การทดสอบหาค่าการทะลวง (Penetration)
- การทดสอบหาจุดวาบไฟ (Flash Point)
- การทดสอบหาค่าการยืดตัว (Ductility)
- การทดสอบหาการละลาย (Solubility in Trichloroethylene)
- การทดสอบหาค่าการสูญเสียเมื่อเกิดความร้อน (Loss on heating)
- การทดสอบหาผลความร้อนและอากาศที่มีผลต่อแอสฟัลต์ (Thin-Film Oven)

2) มวลรวม (Aggregate) วัสดุหลัก ๆ ที่ใช้ทำมวลรวมได้แก่หินย่อยขนาดต่าง ๆ ได้แก่ หิน 3/4 นิ้ว 1/2 นิ้ว 3/8 นิ้ว และหินฝุ่น แต่บางครั้งการเลือกขนาดอาจจะใช้วัสดุอื่นเพิ่มเพื่อให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดได้แก่ ทราย วัสดุผสมแทรก เป็นต้น ในการเลือกวัสดุมวลรวมนั้นต้องมีการทดสอบและประเมินให้อยู่ในเกณฑ์ที่กำหนดโดยแบ่งเป็น มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate) และมวลรวมละเอียด (Fine Aggregate) ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับแหล่งและชนิดของหินด้วยถ้านำหินปูนมาเป็นวัสดุมวลรวมจะช่วยลดการหลุดลอกของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีกว่าหินบะซอลต์ (Saad and Haider, 2004) มีหัวข้อการทดลองดังต่อไปนี้

มวลรวมหยาบ (Coarse Aggregate)

กรมทางหลวงได้ให้คำนิยามของมวลรวมหยาบว่า เป็นมวลรวมที่มีขนาดข้างตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดโตกว่า 4.75 มิลลิเมตร) โดยปกติมวลรวมหยาบจะใช้หินตั้งแต่ 2 ขนาดขึ้นไปในการผสมกัน เช่น ใช้หินขนาดโตสุด 19.0 มิลลิเมตร ผสมกับหินขนาดโตสุด 9.5 มิลลิเมตร เป็นต้น ในการเลือกใช้หินแต่ละขนาดต้องมีลักษณะค่อนข้างเป็นขนาดเดี่ยว (Single Size) เพื่อลดการแยกตัว (Segregation) ทางกรมทางหลวงจึงได้กำหนดให้ทดสอบดังนี้

- 1) วัสดุต้องมีความสะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอนหรืออินทรีย์วัตถุที่จะสามารถทำลายให้แอสฟัลต์เสื่อมคุณภาพ
- 2) เมื่อทำการทดสอบหาค่าความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ตามวิธี AASHTO T 96 จะต้องไม่เกินร้อยละ 40
- 3) เมื่อทำการทดสอบค่าความทนทาน (Soundness Test) ตามวิธี AASHTO T 104 ต้องไม่เกินร้อยละ 9
- 4) เมื่อทำการทดสอบ Coating and Stripping of Bitumen-Aggregate Mixtures ตามวิธี AASHTO T 182 ต้องมีแอสฟัลต์เคลือบไม่น้อยกว่าร้อยละ 95
- 5) ทำการทดสอบค่าดัชนีความแบนและดัชนีความยาว ตามวิธี BS 812 ไม่เกินร้อยละ 30
- 6) ผิวมวลรวมต้องถูกไม่แตกอย่างน้อยหนึ่งหน้า ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50

มวลรวมละเอียด (Fine Aggregate)

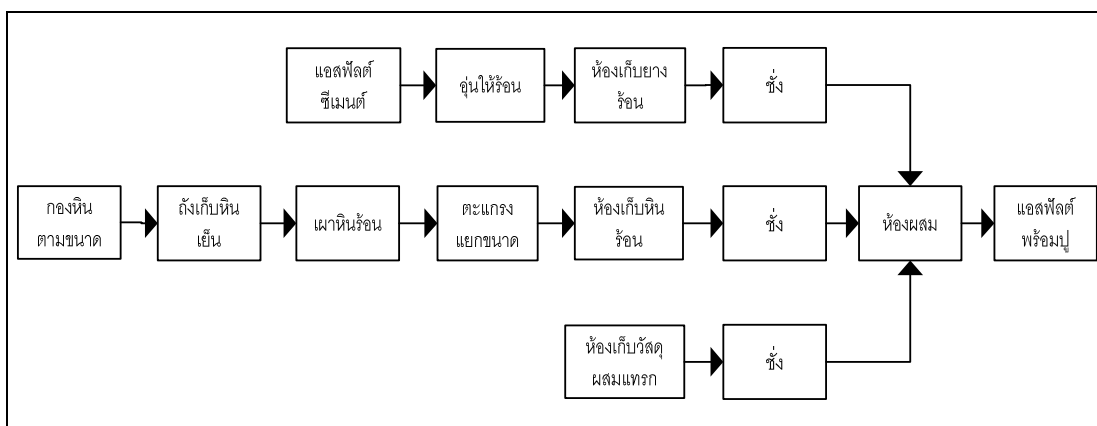
กรมทางหลวงได้ให้คำนิยามของมวลรวมละเอียดว่า เป็นมวลรวมที่มีขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (ขนาดเล็กกว่า 4.75 มิลลิเมตร) โดยปกติมวลรวมละเอียดจะใช้หินฝุ่นเป็นหลักในการเป็นส่วนผสม แต่ในบางครั้งขนาดอาจจะต้องปรับปรุงคุณสมบัติบางอย่างให้ดีขึ้นทางกรมทางหลวงจึงกำหนดให้สามารถใช้ทรายแทนได้แล้วแต่กรณี โดยมีการทดสอบคุณสมบัติดังต่อไปนี้

- 1) วัสดุต้องมีความสะอาดปราศจากสิ่งสกปรก ดินเหนียว ตะกอนหรืออินทรีย์วัตถุที่จะสามารถทำลายให้แอสฟัลต์เสื่อมคุณภาพ
- 2) เมื่อทำการทดสอบค่าทรายสมมูลย์ (Sand Equivalent) ตามวิธี AASHTO T 176 ต้องมีค่าไม่น้อยกว่าร้อยละ 30

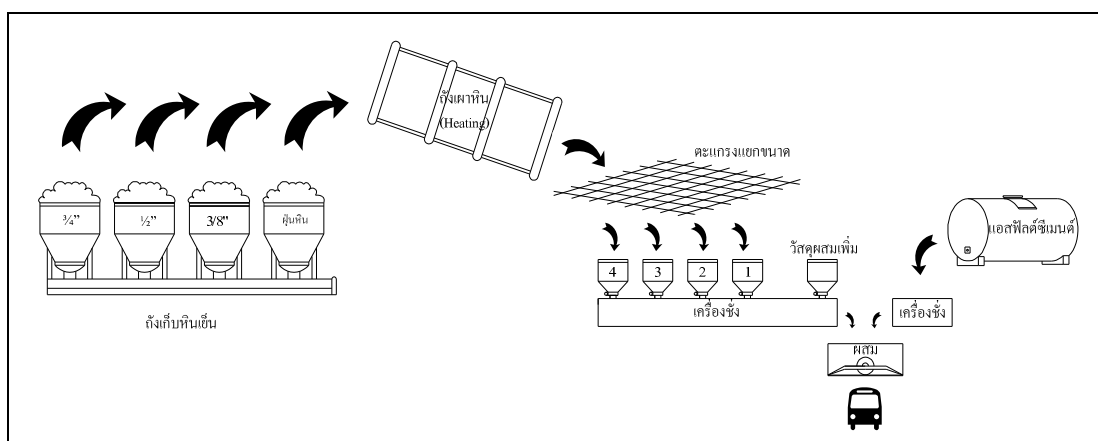
2.3 การผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตนั้นจะต้องทำการทดสอบหาค่าต่าง ๆ เพื่อกำหนดการใช้ปริมาณของแอสฟัลต์ซีเมนต์และมวลรวมให้ถูกต้องและเหมาะสมก่อนจากห้องทดสอบ โดยกรมทางหลวงได้เลือกใช้วิธีทดสอบและวิเคราะห์หาค่าเสถียรภาพแบบมาร์แชลล์ และการเคลื่อนตัวโดยบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ และอุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.604/2517 จากนั้นจะนำค่าที่ได้มาเป็นตัวกำหนดในโรงผสม (Mixing Plant) โดยมีวิธีการผลิตโดยสังเขปได้ดังนี้

- 1) แอสฟัลต์ซีเมนต์ ต้องให้ความร้อนแอสฟัลต์ให้อยู่ในอุณหภูมิที่กำหนดเพื่อพร้อมใช้งาน(อุณหภูมิผสม 150 องศาเซลเซียส)
- 2) วัสดุมวลรวม หินมีขนาดต่างๆหรือทราย (แล้วแต่กรณี) ทำการบรรทุกมากองเก็บที่โรงผสม จากนั้นทำการแบ่งตามขนาดของหินเป็นกอง ๆ เช่นหิน 3/4 นิ้ว กองเฉพาะหิน 3/4 นิ้ว เป็นต้น จากนั้นทำการตักมวลรวมลงใส่ถังหินเย็นของแต่ละขนาด แล้วทำการเปิดถังหินเย็นให้ออกตามที่กำหนดทั้งปริมาตรและเวลา
- 3) หลังจากนั้นลำเลียงวัสดุมวลรวมมายังห้องเผา (Dryer) ทำการเผาให้แห้งและร้อนตามอุณหภูมิที่กำหนด
- 4) เมื่อวัสดุมวลรวมถูกเผาได้อุณหภูมิที่กำหนดแล้วจะถูกลำเลียงไปจัดแยกขนาดโดยผ่านตะแกรงทั้ง 4 ขนาด และส่งไปยังถังหินร้อนเพื่อรอใช้งานต่อไป ถ้าหากมีวัสดุผสมแทรกจะถูกเก็บแยกให้อยู่เฉพาะวัสดุผสมแทรกเพื่อเตรียมผสม โดยขั้นตอนนี้จะทำการเป่าฝุ่นหินที่หลงเหลือมากับหินขนาดต่าง ๆ ออกด้วย
- 5) หลังจากได้มวลรวมที่ถังหินร้อนแล้วจะทำการปล่อยมวลรวมไปยังห้องผสม (Pug mill) ตามอัตราส่วนการผสมให้ได้ตามขนาดละเอียดที่ออกแบบไว้ ในการปล่อยวัสดุมวลรวมนั้นให้ปล่อยมวลรวมใหญ่สุดเรียงขนาดลงไปเล็กสุด จากนั้นผสมวัสดุจนให้เข้ากันดี ใช้เวลาประมาณ 5 นาที (ถ้าหากมีวัสดุผสมแทรกให้ปล่อยลงไปยังห้องผสมตามที่ได้ออกแบบไว้)
- 6) จากนั้นให้ปล่อยแอสฟัลต์ลงไปผสมตามอัตราส่วนที่ออกแบบไว้ ต้องผสมให้เข้ากันดีทั้งหมดโดยเครื่องผสม ใช้เวลาประมาณ 30 - 60 วินาที
- 7) เมื่อผสมเสร็จก็จะได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่สามารถใช้งานได้ตามที่ออกแบบไว้ ขั้นตอนการผลิตสามารถดูได้จากรูปที่ 2.2 และ 2.3



รูปที่ 2.2 แสดงขั้นตอนการผสมแอสฟัลต์คอนกรีต



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการผสมในโรงผสม (Plant Mix)

2.4 วัสดุผสมแทรก (Mineral Filler)

เป็นวัสดุที่ถือว่ามีความสำคัญอย่างหนึ่งต่อแอสฟัลต์คอนกรีตเพราะถ้าหากว่าแอสฟัลต์คอนกรีตมีขนาดกะทัดรัดไม่ดีอาจจะต้องเพิ่มวัสดุผสมแทรกเข้าไปเพื่อปรับปรุงขนาดกะทัดรัดให้ดีขึ้น และในบางครั้งยังสามารถช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็งแรงมากยิ่งขึ้นโดยวัสดุผสมเพิ่มนั้น กรมทางหลวงได้กำหนดให้เป็นวัสดุที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 100 (เล็กกว่า 0.075 มิลลิเมตร) ไม่น้อยกว่าร้อยละ 70 ซึ่งได้แก่ ฝุ่นหิน เถ้าลอยลิกไนต์ ปูนซีเมนต์ ปูนขาว เป็นต้น ซึ่งจากการที่กรมทางหลวงได้กำหนดให้ใช้ฝุ่นหิน ก็เพื่อที่จะนำจำนวนฝุ่นหินที่มีจำนวนมากนำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์ ซึ่ง

สามารถดูจำนวนฝุ่นหินที่เหลือจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตของโรงผสมได้จากรูปที่ 2.4 และ 2.5



รูปที่ 2.4 ลักษณะฝุ่นหินที่กระจัดกระจายไปทั่วโรงผสม



รูปที่ 2.5 ลักษณะฝุ่นหินที่เหลือและกองเก็บเป็นจำนวนมาก

หากแต่ในปัจจุบันได้มีการนำหินที่ระเบิดได้มาจากทาง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา มาใช้เป็นจำนวนมากทำให้ต้องมีการศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติของฝุ่นหินที่ได้อยู่ตลอดและเป็น

การลดจำนวนของฝุ่นหินลง เพื่อทดสอบคุณสมบัติที่ได้จากการผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินให้อยู่เกณฑ์ที่กำหนด เพราะด้วยตัวฝุ่นหินที่ได้นั้นจะถูกเผาไม่น้อยกว่า 150 องศาเซลเซียส จึงทำให้เปลี่ยนคุณสมบัติบางประการออกไปได้

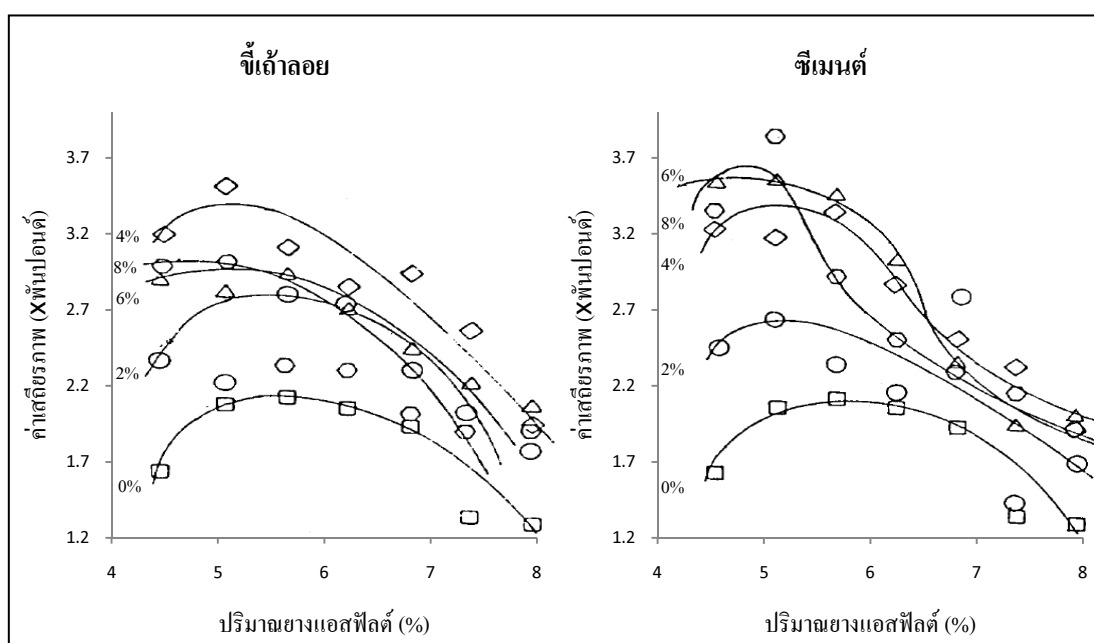
สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์ในปัจจุบันมีการนำมาใช้งานอย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งการผสมในคอนกรีต ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์สามารถใช้เป็นวัสดุร่วมกับซีเมนต์ในงานคอนกรีตได้อย่างเหมาะสมโดยการศึกษาของ ชัย จาตุรพิทักษ์กุล และคณะ (2551) พบว่าการที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมร่วมกับซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ออกแบบพบว่าสามารถช่วยป้องกันการเกิดสนิมของเหล็กในคอนกรีตได้เป็นอย่างดีเพราะคุณสมบัติของเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดเล็กและละเอียดจึงสามารถป้องกันการแทรกซึมผ่านของสารประกอบคลอไรด์ได้ ซึ่งยังมีการศึกษาต่าง ๆ มากมายเกี่ยวกับเถ้าลอยลิกไนต์ โดยสาเหตุหลัก ๆ เกิดจากการที่ กฟผ. ประสบปัญหาอย่างมากเกี่ยวกับมลภาวะและการทำลายทิ้งของวัสดุเถ้าลอยลิกไนต์ที่เกิดจากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์ จึงทำให้ กฟผ. ได้ให้ทุนวิจัยกับมหาวิทยาลัยต่าง ๆ ในการนำเถ้าลิกไนต์ไปศึกษาวิจัยถึงคุณสมบัติทั้งทางที่ดีและไม่ดี และศึกษาถึงความสามารถในการนำไปใช้เป็นวัสดุก่อสร้าง ซึ่งจากการวิจัยต่าง ๆ พบว่าการที่นำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ในการก่อสร้างถือว่ามีความเหมาะสมเพราะด้วยคุณลักษณะของเถ้าลิกไนต์เองจนปัจจุบันเถ้าลอยลิกไนต์ถือเป็นวัสดุสำคัญสำหรับงานก่อสร้างอย่างมากด้วยคุณสมบัติที่ดีและมีราคาถูก จึงสามารถช่วยลดต้นทุนในการก่อสร้างได้เป็นอย่างดี

2.5 ปรัชศน์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บัญชา เอกกัณหา (2538) ได้ศึกษาถึงวัสดุที่ผสมเพิ่มด้วยปูนขาว พบว่าการที่ปูนขาวผสมเพิ่มเข้าไปในแอสฟัลต์คอนกรีตในอัตราส่วน 2.5 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักมวลรวม ที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ของส่วนผสมเท่ากับ 5 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้มีค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 10.81 เปอร์เซ็นต์ มีค่าช่องว่างอากาศน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 31.47 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 1.75 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 7.91 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยปูนขาวมีความแข็งแรงมากขึ้นเหมาะกับการนำมาผสมในแอสฟัลต์คอนกรีต นอกจากนี้ยังได้วิจัยเพิ่มเติมโดยการผสมเพิ่มกับซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักมวลรวมพบว่า มีค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 38.98 เปอร์เซ็นต์ มีค่าช่องว่างอากาศน้อยกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 97.51 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 4.77 เปอร์เซ็นต์ มี ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมน้อยกว่า

แอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 26.72 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์เหมาะสมกับการจราจรที่มีรถบรรทุกหนักวิ่งเป็นประจำ

ชัยชาญ วรนิทัศน์ (2530) ได้ศึกษาการผสมเพิ่มเปรียบเทียบคุณสมบัติของซีเมนต์กับซีเมนต์ปอร์ตแลนด์โดยใช้การทดสอบเลือกขนาดแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ละ 0.5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อความเหมาะสมของแต่ละเปอร์เซ็นต์ วัสดุผสมเพิ่ม พบว่าการที่แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักมวลรวมจะมีผลทดสอบค่าเสถียรภาพใกล้เคียงกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เปรียบเทียบค่าเสถียรภาพที่วัสดุอัดแทรกต่าง ๆ (ชัยชาญ วรนิทัศน์, 2530)

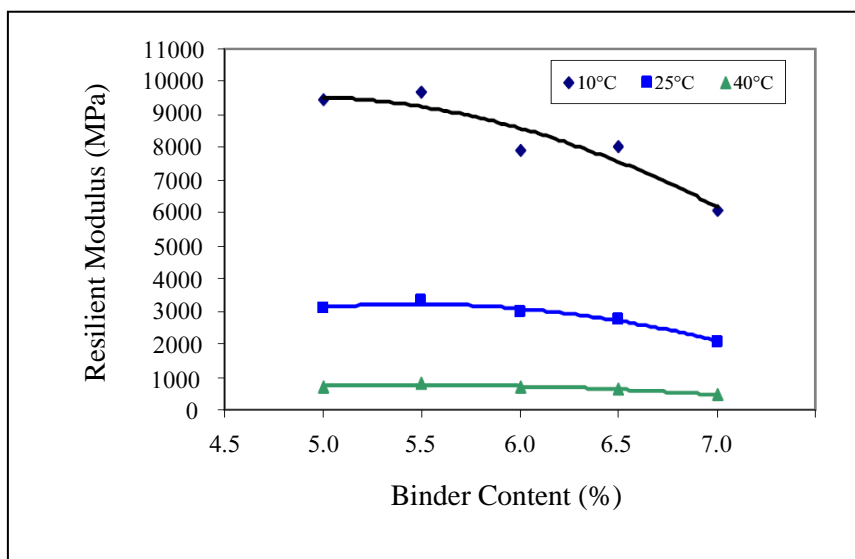
และการที่ซีเมนต์มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่านี้จะทำให้ส่วนผสมร่วนขึ้นมีค่าเสถียรภาพลดลง นอกจากนี้ยังทำให้ค่าหน่วยน้ำหนักและค่ายุบตัวเพิ่มขึ้น ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์โพรงอากาศและค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างมวลรวมลดลง ซึ่งส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ช่องว่างมีแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้น ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ในอัตราส่วนที่ไม่เกิน 4 เปอร์เซ็นต์ เหมาะกับการใช้กับถนนที่มีการจราจรหนักหนาแน่น

สมพงษ์ ชีโรสง (2542) ได้ศึกษาการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต รวมไปถึงการปรับปรุงคุณภาพของยางแอสฟัลต์ซีเมนต์พบว่าการที่เถ้าลอยลิกไนต์มีขนาดเม็ดละเอียด (ขนาดเม็ด 0.001 - 0.075 มิลลิเมตร) มาผสมไม่เกินร้อยละ 30 ของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์

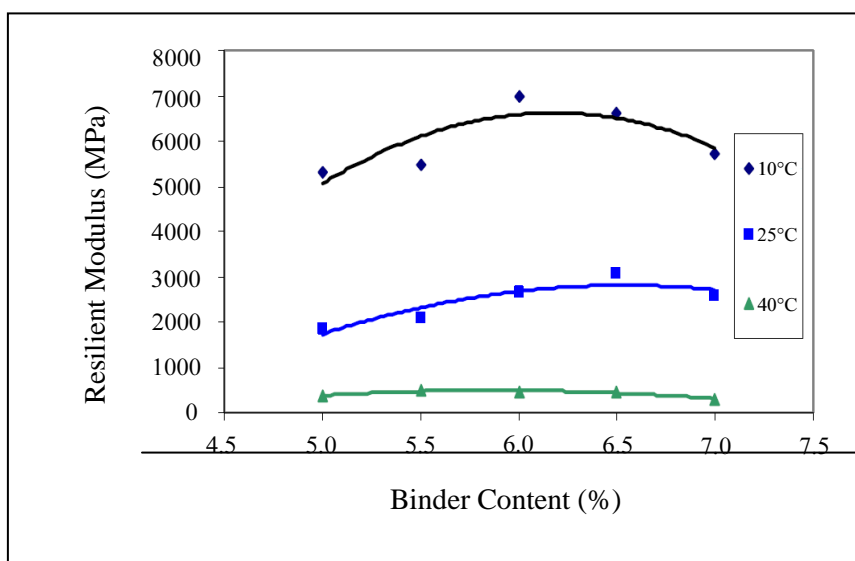
จะทำให้มีค่าเสถียรภาพดีขึ้น ค่าโพรงอากาศลดลง มีค่าความหนาแน่นมากขึ้นสามารถนำมาออกแบบเป็นชั้นผิวทางได้ แต่ถ้ามีการเพิ่มปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์เพิ่มขึ้น และมีขนาดโตขึ้นจะทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตร่วนขึ้น และมีค่าเสถียรภาพลดลง นอกจากนี้ได้ทำการทดลองโดยการใส่เถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมแทนหินฝุ่น เปรียบเทียบกับแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้หินฝุ่น พบว่าการที่แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมจะมีลักษณะค่อนข้างร่วน ความหนาแน่นน้อยลง ค่าโพรงอากาศมากขึ้น ค่าเสถียรภาพต่อการไหลต่ำกว่าข้อกำหนด และค่าเสถียรภาพน้อยลงแต่อยู่ในข้อกำหนดซึ่งเหมาะกับงานชั้นรองผิวทาง

วัชรินทร์ วิทยกุล และ นิรชร พึ่งแดง (2539) ได้ทำการศึกษาการใช้เถ้าลอยลิกไนต์พบว่าเมื่อนำเถ้าลอยลิกไนต์ผสมในสัดส่วนของ ถึงร้อน 1 โดยใช้หิน 2 ชนิดคือหินปูนและหินบะซอลต์ โดยหินปูนจะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์และหินฝุ่นมีค่าเท่ากับ 0.043 ที่เหมาะสมของเถ้าลอยลิกไนต์อยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 6 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ ส่วนหินบะซอลต์ จะได้อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างเถ้าลอยลิกไนต์และหินฝุ่นมีค่าเท่ากับ 0.042 ที่เหมาะสมของเถ้าลอยลิกไนต์ และแอสฟัลต์อยู่ที่ 2 เปอร์เซ็นต์ และ 7.2 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ และจากการศึกษาพบว่าการที่นำเถ้าลอยลิกไนต์มาผสมเพิ่มนั้นจะทำให้ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นด้วยเนื่องจากลักษณะของเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีรูปร่างเป็นรูปพรุน

Meor Hamzah and Teoh Yi (2008) ได้ทำการศึกษาถึงการใช้ตะกรันเหล็กที่นำมาจากโรงถลุงมาเป็นส่วนผสมแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยทดแทนในหินฝุ่นบางส่วน (ตะกรันเหล็ก 50 เปอร์เซ็นต์ หินแกรนิต 50 เปอร์เซ็นต์) และทดแทนทั้งหมด (ตะกรันเหล็ก 100 เปอร์เซ็นต์) จากการศึกษาครั้งนี้เพื่อต้องการนำตะกรันเหล็กจำนวนมากที่เหลือทิ้งจากโรงงาน ให้นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์เพื่อลดปัญหาทางสิ่งแวดล้อม และเพื่อต้องการแก้ปัญหาของถนนที่เกิดการพังได้ง่ายรวมไปถึงการเกิดร่องล้อด้วย โดยการทดลองนี้ใช้การทดสอบออกแบบด้วยวิธีค่าโมดูลัสคืนตัว (RESILIENT MODULUS) ซึ่งผลการทดสอบเป็นดังรูปที่ 2.7 และ 2.8



รูปที่ 2.7 ผลทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแทนตะกรันเหล็กทั้งหมด
(Meor Hamzah and Teoh Yi, 2008)



รูปที่ 2.8 ผลทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวแทนตะกรันเหล็กและหินแกรนิตครึ่งหนึ่ง
(Meor Hamzah and Teoh Yi, 2008)

จากผลการทดสอบพบว่าตะกรันเหล็กสามารถแทนที่หินแกรนิตได้ดีและมีผลการทดสอบค่าโมดูลัสคืนตัวดีกว่าการผสมกันระหว่างตะกรันเหล็กและหินแกรนิตด้วยแต่การทดสอบยังพบว่าอุณหภูมิมีส่วนสำคัญอย่างมากต่อค่าโมดูลัสคืนตัวโดยรูปที่ 2.7 และรูปที่ 2.8 จะพบว่าอุณหภูมิที่ 10 องศาเซลเซียส มีค่าโมดูลัสคืนตัวดีกว่าอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

Tienfuan Kerh et al. (2005) ได้ทำการศึกษาถึงปัญหาการหลุดลอกของผิวจราจรแอสฟัลต์คอนกรีตรวมไปถึงสาเหตุของการเกิดร่องล้อ ซึ่งอาจเกิดมาจากส่วนผสมที่ไม่ดีพอของมวลรวม ดังนั้นการศึกษานี้ได้ปรับปรุงมวลรวมของวัสดุผสม โดยการเปรียบเทียบระหว่างแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ผสมวัสดุผสมเพิ่มกับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยปูนขาว และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ในอัตราส่วน 1 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักหินฝุ่น ซึ่งมีผลการทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลการทดสอบแบบมาร์แชลล์ระหว่างหินฝุ่น ปูนขาวและซีเมนต์

(Tienfuan Kerh et al., 2005)

| Items | Rock flour | R.f + 1% Lime | R.f + 1% Cement | Codes |
|----------------------------------|------------|---------------|-----------------|--------|
| Unit weight (kg/m ³) | 2.370 | 2.368 | 2.372 | - |
| Stability value (kg) | 1222 | 1327 | 1236 | > 600 |
| Flow value (0.01") | 14.25 | 13.10 | 14.23 | 8 - 16 |
| Void rate(%) | 3.45 | 3.35 | 3.43 | 3 - 5 |
| V.M.A. (%) | 13.70 | 13.90 | 13.80 | > 13 |
| Best oil content (%) | 5.3 | 5.5 | 5.4 | - |

จากตารางที่ 2.5 จะพบว่าค่าที่ผสมเพิ่มด้วยปูนขาวจะมีค่า เสถียรภาพดีที่สุดอยู่ที่ 1,327 กิโลกรัม รองลงมาเป็นผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์อยู่ที่ 1,236 กิโลกรัม และหินฝุ่นมีค่าเสถียรภาพอยู่ที่ 1,222 กิโลกรัม และจากการทดสอบหาค่าโมดูลัสคืนตัวสามารถสรุปได้ว่าการที่ผสมเพิ่มด้วยปูนขาวและซีเมนต์นั้นสามารถช่วยลดการหลุดลอกออกไปได้ เพราะมีความหนาแน่นมากขึ้นทำให้ลดช่องว่างในแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาได้และจากค่าเสถียรภาพที่เพิ่มขึ้นทำให้สามารถป้องกันการเกิดร่องล้อได้ดีขึ้นด้วย

Shaopeng Wu et al. (2006) ได้พบปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากโรงผลิตเหล็ก โดยการผลิตเหล็กแต่ละครั้งจะได้ ตะกรันเหล็กออกมาประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ ของจำนวนเหล็กทั้งหมด

ซึ่งจะมีปริมาณที่มากและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมด้วย ดังนั้นจึงมีแนวคิดที่จะนำมาทดสอบเป็นส่วนผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเลือกเปรียบเทียบกับหินบะซอลต์ซึ่งได้ผลการทดสอบโครงสร้างทางฟิสิกส์ ดังตารางที่ 2.2 และผลการทดสอบแบบมาร์แชลล์ ดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.2 ผลการทดสอบทางโครงสร้างฟิสิกส์ (Shaopeng Wu et al., 2006)

| Items | Bulk density (g/cm ³) | Cumulus density (g/cm ³) | Water Absorption (%) | Crushing value (%) | Polishing stone value (%) | Binder adhesion (%) | LA abrasion (%) |
|------------|--------------------------------------|--|----------------------------|--------------------------|---------------------------------|---------------------------|--------------------|
| Steel slag | 3.30 | 1.90 | 1.29 | 12.1 | 58 | > 95 | 13.2 |
| Basalt | 2.85 | 1.70 | 0.68 | 12.7 | 48 | > 85 | 15.8 |

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบแบบมาร์แชลล์ (Shaopeng Wu et al., 2006)

| Items | Optimal asphalt content (%) | Density (g/cm ³) | Air voids (%) | VMA (%) | Marshall stability (kN) |
|----------------|--------------------------------|------------------------------|---------------|---------|----------------------------|
| Steel slag | 6.4 | 2.610 | 3.9 | 18.5 | 10.8 |
| Basalt | 6.2 | 2.520 | 4.0 | 18.7 | 11.5 |
| Specifications | - | - | 3-4 | > 17.0 | > 6.0 |

ผลการทดสอบพบว่าด้วยตะกรันเหล็กที่มีลักษณะเม็ดที่ละเอียดและขรุขระมากกว่านั้นจะทำให้ ตะกรันเหล็กมีความหนาแน่นมาก เพราะด้วยขนาดเล็กจะสามารถอุดช่องว่างได้ดีกว่า และการนำตะกรันเหล็กมาผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีตจะสามารถต้านทานต่อการบดทับของจราจรต่ออุณหภูมิที่สูงและต่ำได้ดีกว่าหินชนิดบะซอลต์

Ratnasamy Muniandy et al. (2008) ได้พบว่าในปัจจุบันมีการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ในการก่อสร้างงานต่าง ๆ อย่างมากมายทำให้วัสดุต่าง ๆ เหลื่อน้อยลง และยังพบว่าในกระบวนการผลิตต่าง ๆ จะมีวัสดุที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตอยู่มาก เพื่อลดปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อม จึงได้ศึกษาถึงความเหมาะสมทางด้านฟิสิกส์และเคมีขององค์ประกอบวัสดุของ แก้วลอยลิกไนต์ ฝุ่นหินปูน ผงเซรามิก และตะกรันเหล็ก ว่าอยู่ในมาตรฐาน ASTM C618, Class N, (Natural Pozzolan) หรือไม่ เพื่อดูความเหมาะสมการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตโดยมีผลการทดลองดังตารางที่ 2.4 - 2.7

ตารางที่ 2.4 ผลทดสอบทางเคมีเถ้าลอยลิกไนต์ (Ratnasamy Muniandy et al., 2008)

| Chemical (elemental) analysis using EDX | Weight % | ASTM C618, Class N, (Natural Pozzolan) |
|--|----------|---|
| Calcium Carbonate, Ca Co ₃ | 10.33 | - |
| Silicon Dioxide, Si O ₂ | 54.57 | - |
| Magnesium Oxide, Mg O | 4.22 | 5.0% Maximum |
| Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ | 8.24 | - |
| Calcium, Ca | 6.85 | - |
| Titanium, Ti | 0.33 | - |
| Iron, Fe | 14.28 | - |
| Sum of Si O ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe | 77.09 | 70% Minimum |
| Feldspar, K Potassium | 0.76 | - |
| Available Alkalies as Na ₂ O | - | 1.5% Maximum |
| Sulfur Trioxide, SO ₂ | - | 4% Minimum (ASTMC114) |

ตารางที่ 2.5 ผลทดสอบทางเคมีฝุ่นหินปูน (Ratnasamy Muniandy et al., 2008)

| Chemical (elemental) analysis using EDX | Weight % | ASTM C618, Class N, (Natural Pozzolan) |
|--|----------|---|
| Calcium Carbonate, Ca Co ₃ | 7.27 | - |
| Silicon Dioxide, Si O ₂ | 45.70 | - |
| Magnesium Oxide, Mg O | 0.45 | 5.0% Maximum |
| Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ | - | - |
| Calcium, Ca | 40.77 | - |
| Titanium, Ti | - | - |
| Iron, Fe | - | - |
| Sum of Si O ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe | 45.70 | 70% Minimum |
| Feldspar, K Potassium | - | - |
| Available Alkalies as Na ₂ O | - | 1.5% Maximum |
| Sulfur Trioxide, SO ₂ | - | 4% Minimum (ASTMC114) |

ตารางที่ 2.6 ผลทดสอบทางเคมีผงเซรามิก (Ratnasamy Muniandy et al., 2008)

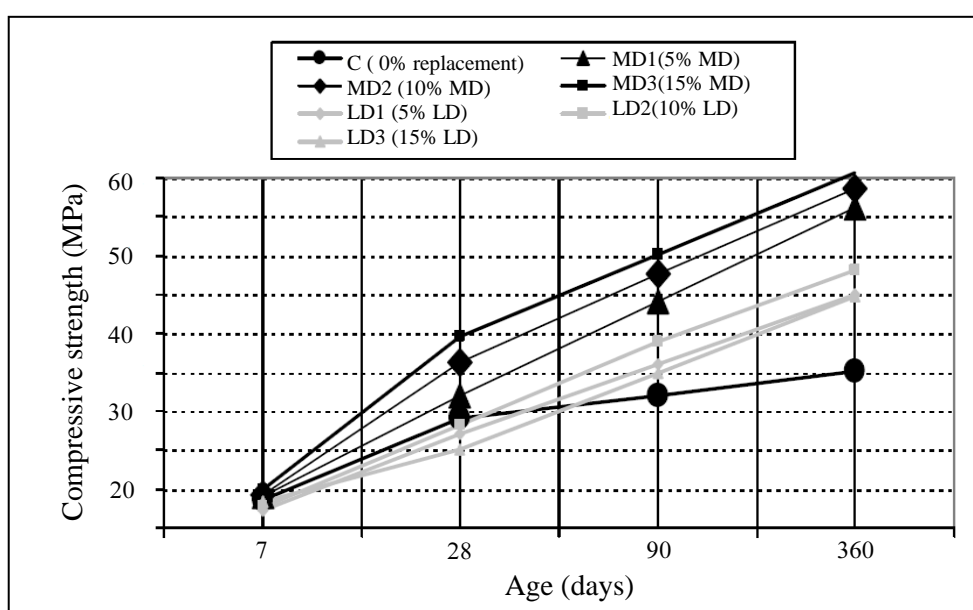
| Chemical (elemental) analysis using EDX | Weight % | ASTM C618, Class N, (Natural Pozzolan) |
|--|----------|---|
| Calcium Carbonate, Ca Co ₃ | 8.00 | - |
| Silicon Dioxide, Si O ₂ | 79.94 | - |
| Magnesium Oxide, Mg O | 0.45 | 5.0% Maximum |
| Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ | 8.54 | - |
| Calcium, Ca | 40.77 | - |
| Titanium, Ti | 0.31 | - |
| Iron, Fe | 1.11 | - |
| Sum of Si O ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe | 84.59 | 70% Minimum |
| Feldspar, K Potassium | 1.55 | - |
| Available Alkalis as Na ₂ O | - | 1.5% Maximum |
| Sulfur Trioxide, SO ₂ | 2.02 | 4% Minimum (ASTMC114) |

ตารางที่ 2.7 ผลทดสอบทางเคมีตะกั่วเหล็ก (Ratnasamy Muniandy et al., 2008)

| Chemical (elemental) analysis using EDX | Weight % | ASTM C618, Class N, (Natural Pozzolan) |
|--|----------|---|
| Calcium Carbonate, Ca Co ₃ | 4.25 | - |
| Silicon Dioxide, Si O ₂ | 41.41 | - |
| Magnesium Oxide, Mg O | 0.36 | 5.0% Maximum |
| Aluminum Oxide, Al ₂ O ₃ | 16.71 | - |
| Calcium, Ca | 1.07 | - |
| Titanium, Ti | 0.82 | - |
| Iron, Fe | 17.45 | - |
| Sum of Si O ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe | 95.93 | 70% Minimum |
| Feldspar, K Potassium | 0.33 | - |
| Available Alkalis as Na ₂ O | 0.64 | 1.5% Maximum |
| Sulfur Trioxide, SO ₂ | - | 4% Minimum (ASTMC114) |

จากผลการทดสอบทางด้านฟิสิกส์และเคมีพบว่า การจะนำวัสดุทั้ง 4 ชนิดนี้ไปเป็นวัสดุผสมเพิ่มถือว่ามีความเหมาะสมอยู่ในมาตรฐาน ASTM C618, Class N, (Natural Pozzolan) และสามารถนำไปศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผสมเพิ่มอีกในอนาคต

Hanifi Binici et al. (2007) ได้ศึกษาการนำฝุ่นหินอ่อน (marble dusts) และฝุ่นหินปูน (limestone dusts) มาเป็นส่วนผสมโดยแทนที่ทรายผสมในคอนกรีต โดยการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ส่วนผสมฝุ่นหินอ่อนและฝุ่นหินปูนแทนที่ทรายในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งผลทดสอบมีดังรูปที่ 2.9

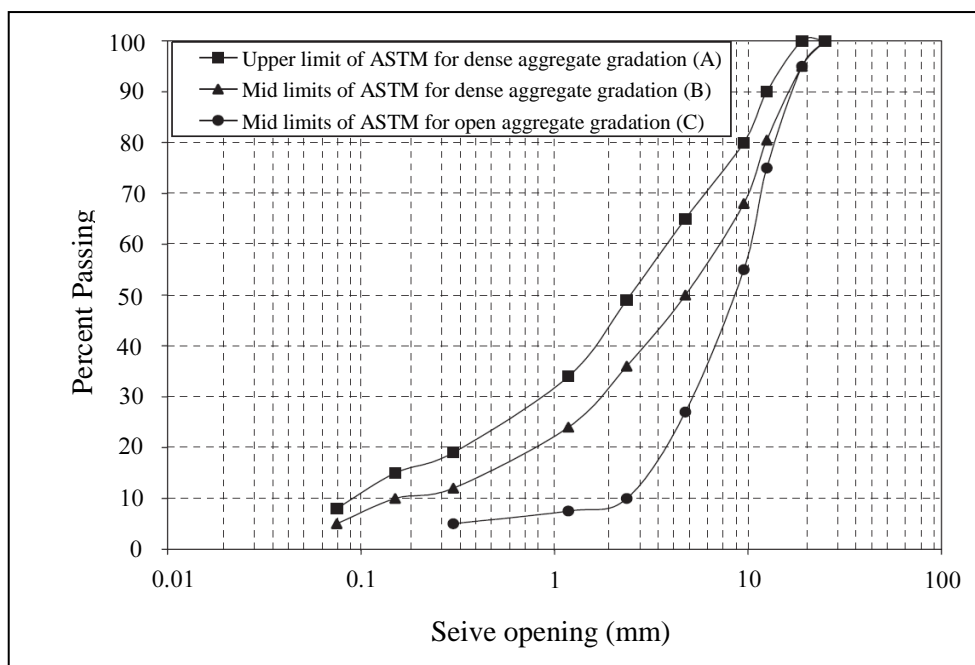


รูปที่ 2.9 ผลการทดสอบกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ (Hanifi Binici et al., 2007)

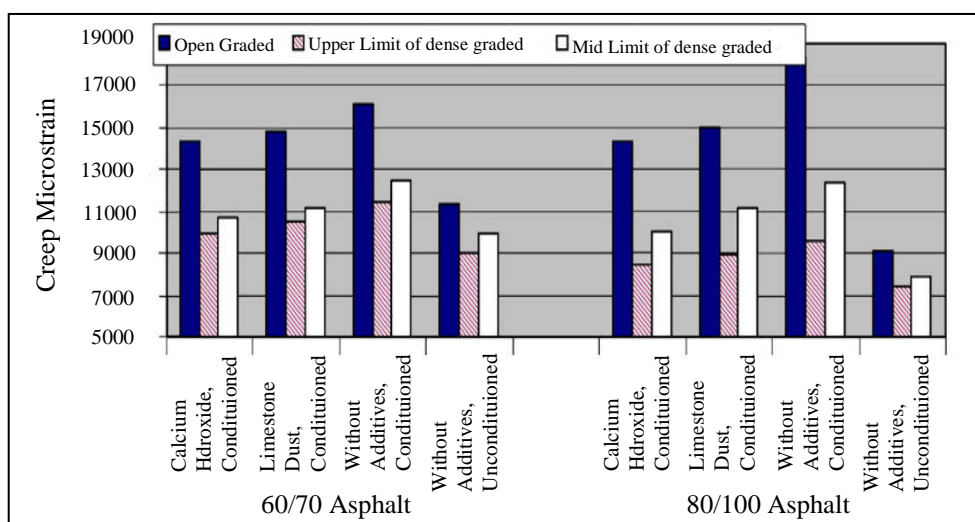
ผลการทดสอบพบว่า การที่นำส่วนผสมฝุ่นหินอ่อนและฝุ่นหินปูนแทนที่ทรายในคอนกรีตนั้น จะเห็นว่ากำลังอัดจะเพิ่มขึ้นตามอายุการบ่ม โดยในอัตราส่วน 15 เปอร์เซ็นต์ จะให้กำลังอัดที่ดีที่สุด โดยฝุ่นหินอ่อนอยู่ที่ 60 เมกะปาสคาล ฝุ่นหินปูนอยู่ที่ 48 เมกะปาสคาล และ คอนกรีตธรรมดาอยู่ที่ 35 เมกะปาสคาล ซึ่งส่วนผสมทั้ง 2 ชนิดถือว่ามีความเหมาะสมกับการนำมาเป็นส่วนผสมแทนที่ทรายในคอนกรีตได้เป็นอย่างดี

Saad and Haider (2005) ได้ศึกษาถึงความต้องการการป้องกันการหลุดลอกของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้วัสดุธรรมชาติ ซึ่งวัสดุที่ใช้มี 2 ชนิดคือ ฝุ่นหินปูน (limestone dust) ที่เหลือจากโรง

ผลิตในจอร์แดน และสารผสมเพิ่ม แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (calcium stearate hydroxide) ซึ่งจะแบ่งการทดลอง ใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 60 - 70 และ 80 - 100 แบ่งส่วนผสมเป็น 3 ขนาดคละดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขนาดคละที่ใช้ทดสอบ (Saad and Haider, 2005)



รูปที่ 2.11 ผลทดสอบการหลุดลอกของส่วนผสมต่าง ๆ

(Saad and Haider, 2005)

ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.11 พบว่าการที่ผสมเพิ่มด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ จะสามารถป้องกันการหลุดลอกของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นฝุ่นหินปูนและแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเพิ่ม ดังนั้นการที่นำวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 2 ชนิดมาผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต จะสามารถช่วยป้องกันการหลุดลอกได้เป็นอย่างดีและยังสามารถนำวัสดุธรรมชาติที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาใช้ได้อย่างเหมาะสม

Md. Jahir et al. (2006) ได้ศึกษาการใช้เถ้าลอยลิกไนต์เป็นส่วนผสมทดแทนซีเมนต์ในคอนกรีต ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้อย่างกว้างขวางในหลายด้านเกี่ยวกับงานก่อสร้าง เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในการนำมาผสมทดแทนซีเมนต์โดยการศึกษาได้ทำการทดแทนในอัตราส่วน 5 เปอร์เซ็นต์ 10 เปอร์เซ็นต์ 15 เปอร์เซ็นต์ และ 20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยศึกษาถึงคุณสมบัติทางเคมีและทดสอบกำลังอัดที่อายุต่าง ๆ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 2.8 และ 2.9

ตารางที่ 2.8 ผลทดสอบทางเคมีเถ้าลอยลิกไนต์ (Md. Jahir et al., 2006)

| Constituents | %Weight |
|--------------------------------|-----------------------|
| SiO ₂ | 23.72 |
| Al ₂ O ₃ | 5.30 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.8 |
| CaO | 65.80 |
| MgO | 1.26 |
| K ₂ O | 1.60 |
| Surface area | 755 m ² /g |

ตารางที่ 2.9 ผลทดสอบกำลังอัดอายุ 3 7 และ 28 วัน (Md. Jahir et al., 2006)

| Types of cement Age (Days) | Stress (psi)of Shah special cement | Stress (psi)of Shah special cement with 5% Fly ash | Stress (psi)of Shah special cement with 10% Fly ash | Stress (psi)of Shah special cement with 15% Fly ash | Stress (psi)of Shah special cement with 20% Fly ash |
|-------------------------------|--|---|--|--|--|
| 3 | 2332.08 | 2187.08 | 2189.01 | 2165.33 | 2078.45 |
| 7 | 3169.06 | 2929.84 | 3196.28 | 3081.25 | 2976.42 |
| 28 | 4046.46 | 3547.18 | 3991.4 | 3651.1 | 3579.55 |

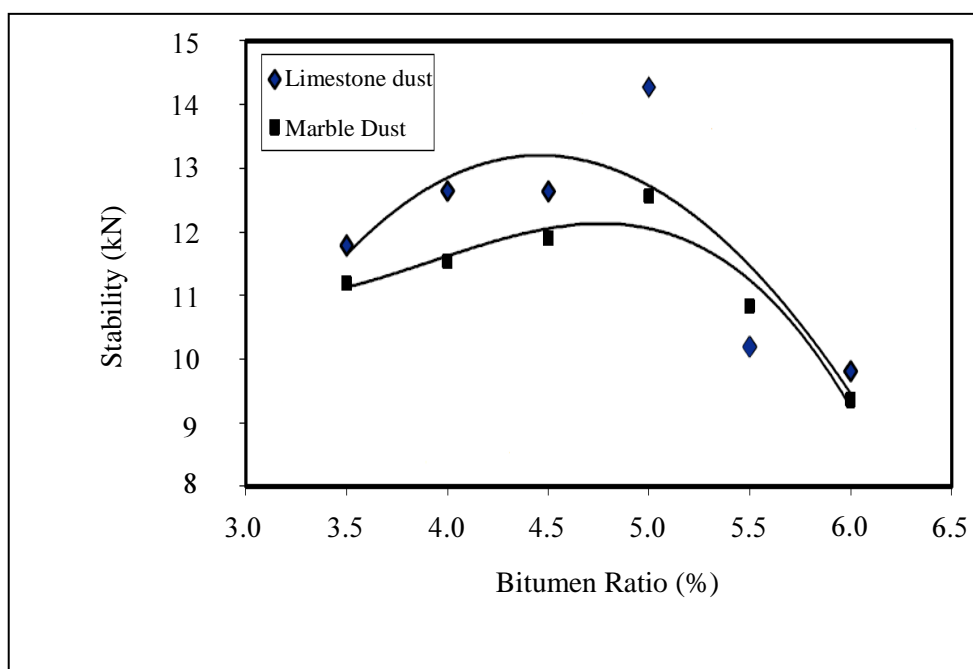
จากการทดสอบทางเคมีของเถ้าลอยลิกไนต์ผลทดสอบอยู่ในมาตรฐานของ ASTM สามารถนำมาเป็นวัสดุผสมในคอนกรีตได้ และจากการทดสอบกำลังอัดในอายุต่าง ๆ พบว่ากำลังอัดที่ผสมทดแทนในอัตราส่วน 10 เปอร์เซ็นต์ มีความเหมาะสมที่สุดโดยการที่ผสมทดแทนมากขึ้นมากกว่านี้จะทำให้กำลังอัดลดลงซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำมาทดแทน ดังนั้นการที่นำเถ้าลอยลิกไนต์มาเป็นส่วนผสมทดแทนซีเมนต์มีความเหมาะสมและยังช่วยลดปัญหาทางมลภาวะของจำนวนเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีจำนวนมากอย่างเหมาะสม

Mustafa and Serdal (2005) ได้พบปัญหาของการนำหินธรรมชาติมาใช้ในการอุตสาหกรรมจำนวนมาก โดยการผลิตชิ้นงานหินอ่อน (marble) นั้นการผลิตจะต้องตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ตามการสั่งของลูกค้าซึ่งในการตัดนั้นจะมีฝุ่นหินอ่อน (marble dust) จำนวนมากที่หลงเหลือจากการตัดและมีปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมทางอากาศในบริเวณนั้น จึงได้คิดที่จะนำมาเป็นส่วนผสมทดแทนฝุ่นหินปูน (limestone dust) ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในตุรกี ดังนั้นเพื่อจะลดปริมาณฝุ่นหินอ่อนลงจึงเลือกการทดลองเปรียบเทียบกับการใช้ฝุ่นหินปูนในอัตราส่วนต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ขนาดผลตามอัตราส่วนระหว่างฝุ่นหินต่อยางแอสฟัลต์

(Mustafa and Serdal, 2005)

| Sieve | Filler/bitumen ratio in volume | | | | |
|--------|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| | 0.4 | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 |
| 1" | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 3/4" | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1/2" | 81.95 | 85.37 | 88.90 | 92.40 | 95.63 |
| 3/8" | 71.85 | 74.68 | 77.67 | 80.60 | 83.32 |
| NO.4 | 52.90 | 56.14 | 59.50 | 62.80 | 65.86 |
| NO.10 | 36.85 | 39.91 | 43.10 | 46.20 | 49.09 |
| NO.40 | 17.65 | 19.99 | 22.42 | 24.80 | 27.01 |
| NO.80 | 9.50 | 11.30 | 13.17 | 15.00 | 16.70 |
| NO.200 | 4.30 | 5.40 | 6.50 | 7.60 | 8.60 |



รูปที่ 2.12 ผลทดสอบค่าเสถียรภาพแบบมาร์แชลล์

(Mustafa and Serdal, 2005)

ผลการทดสอบดังรูปที่ 2.12 แบบมาร์แชลล์พบว่าการใช้ฝุ่นหินอ่อนมีค่าเสถียรภาพน้อยกว่าการใช้ฝุ่นหินปูนและฝุ่นหินปูนจะใช้ปริมาณของยางแอสฟัลต์น้อยกว่าฝุ่นหินอ่อน และยังได้ทดสอบแบบ Dynamic Plastic Deformation ที่ 1,000 2,000 3,000 4,000 และ 5,000 รอบ พบว่าการที่ใช้ฝุ่นหินอ่อนมาผสมนั้นเหมาะกับผิวทางที่มีปริมาณการจราจรน้อย

2.6 สรุปผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าปัจจุบันได้มีการนำวัสดุชนิดฝุ่นหินต่าง ๆ รวมทั้งเถ้าลอยลิกไนต์และตะกรันเหล็ก มาใช้ในงานก่อสร้างมากขึ้นอาจเป็นเพราะวัสดุดังกล่าวจะมีจำนวนมากขึ้นในแต่ละปี และส่งผลต่อมลภาวะทางอากาศอย่างมาก ทำให้มีการนำวัสดุเหล่านั้นมาศึกษาถึงความเป็นไปได้การนำมาผสมเพิ่มในวัสดุก่อสร้างไม่ว่าจะเป็นการนำมาเป็นชั้นรองผิวทางผสมในคอนกรีตหรือแม้แต่การผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต ฯลฯ พร้อมทั้งวิเคราะห์ถึงโครงสร้างลักษณะรูปร่างและคุณสมบัติทางเคมีต่าง ๆ ที่อาจส่งผลกระทบต่อความคงทนและแข็งแรงของวัสดุเหล่านั้นได้

ดังนั้นจากการศึกษางานวิจัยต่าง ๆ ผู้วิจัยได้เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ เกรด 60 - 70 ที่เหมาะสมกับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาแล้วทำการผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินที่เหลือจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตจากโรงผสม และเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหลือจากกระบวนการเผาไหม้จากถ่านหิน มาผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยเปรียบเทียบกับ การผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ตามอัตราส่วนที่ออกแบบในบทที่ 1 เพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมาผสมเพิ่มที่ใช้ปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เท่าเดิมรวมทั้งศึกษาโครงสร้าง คุณสมบัติทางฟิสิกส์และเคมีของวัสดุผสมแทรก โดยอ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวง

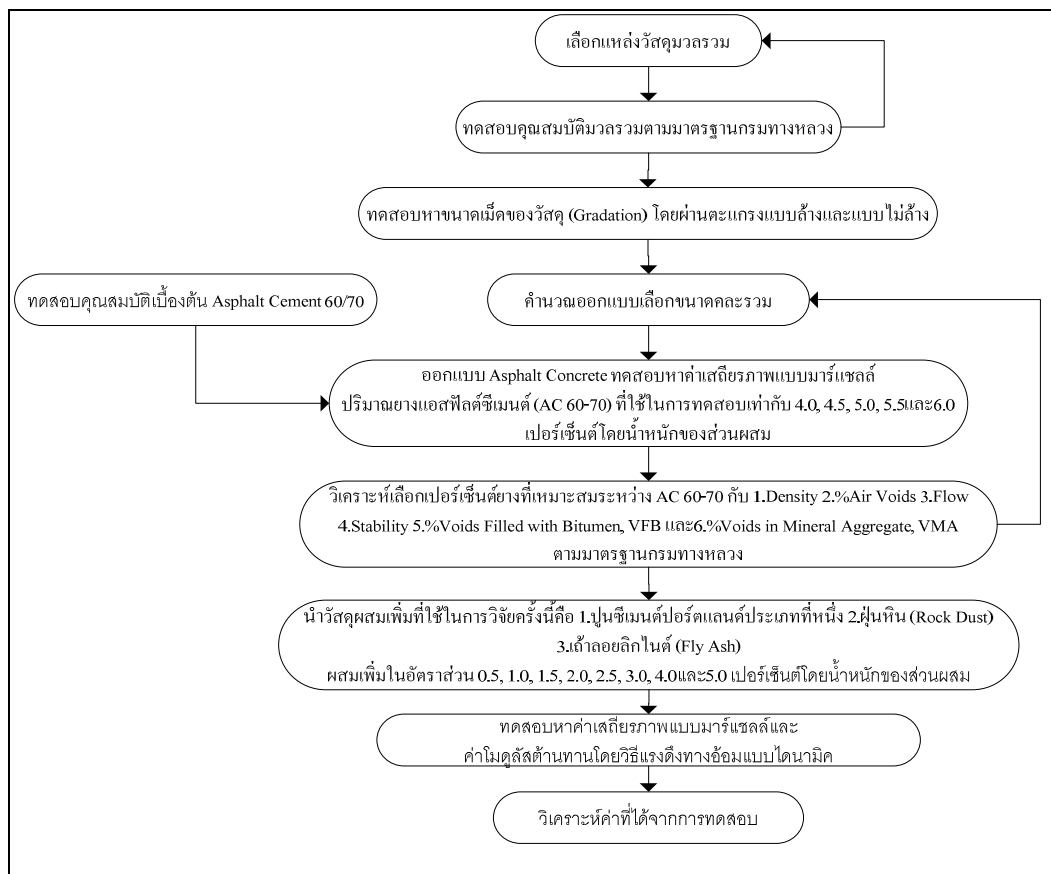
บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติของแอสฟัลต์ซีเมนต์ การจำแนกและกำหนดขนาดกะของมวลรวม การทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและลักษณะรูปร่างของวัสดุผสมเพิ่ม การทดสอบด้วยวิธีมาร์แชลล์ และการทดสอบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการทำวิจัยสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 สรุปขั้นตอนการทำวิจัย

จากรูปที่ 3.1 เป็นการอธิบายสรุปถึงขั้นตอนการทำวิจัย โดยอันดับแรกจะต้องทำการเลือกแหล่งหินที่นำมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมให้ตรงตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่กำหนด ซึ่งถ้าหากไม่ตรงตามมาตรฐานให้ทำการเลือกแหล่งวัสดุใหม่ จากนั้นทดสอบหาขนาดผลรวมเพื่อใช้ในการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตแล้วทำการผสมเพิ่มตามอัตราส่วนที่กำหนดเพื่อทดสอบหาปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมโดยวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.604/2517

เมื่อได้วัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นทำการผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยอีกในสัดส่วนที่ได้ออกแบบไว้เพื่อหาปริมาณของวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิดที่เหมาะสมด้วยวิธีมาร์แชลล์และค่าโมดูลัสด้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม พร้อมทั้งอธิบายถึงสาเหตุของผลทดสอบที่ได้ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดสอบตามหัวข้อ 3.2 ถึง 3.6

3.2 ทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์

แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60 - 70 ที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากบริษัทปิโกล์แอสฟัลต์ จำกัด (มหาชน) ซึ่งมีคุณสมบัติตรงตามข้อกำหนดของกรมทางหลวงที่ ทล.-ก.401/2531 ในงานวิจัยครั้งนี้ต้องทำการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60 - 70 เพิ่มเติมเพื่อใช้เป็นค่าในการคำนวณหาปริมาณยางในแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม ดังต่อไปนี้

- 1) ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ AASHTO T228 - 85
- 2) ทดสอบหาค่าการดูดซึมแอสฟัลต์ของมวลรวม (Asphalt Absorption) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.414/2547

3.3 ทดสอบวัสดุมวลรวม

การทดสอบวัสดุมวลรวมถือเป็นการทดสอบที่มีความสำคัญอย่างมากเพราะเป็นตัวกำหนดความแข็งแรงของแอสฟัลต์คอนกรีต วัสดุมวลรวมที่ใช้นำมาจากโรงโม่หิน ตำบลหนองน้ำแดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา และทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวัสดุการทาง (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และหน่วยวิเคราะห์และตรวจสอบทางวิศวกรรม กรมทางหลวงที่ 8 แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 ชนิดดังนี้

- 1) วัสดุมวลหยาบ

เป็นวัสดุที่ค้ำตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) ซึ่งมีความสำคัญอย่างมากในการผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตเพราะเป็นวัสดุที่มีความแข็งแรงและใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ในปริมาณน้อยกว่าวัสดุมวลละเอียด อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุมวลรวมหยาบต้องคำนึงถึงขนาดผลรวมด้วยเพราะจะ

ทำให้มีช่องว่างมากเกินไปและทำให้แอสฟัลต์มีเสถียรภาพไม่ดีพอ ดังนั้นจึงต้องทำการทดสอบให้ตรงตามมาตรฐานของกรมทางหลวงดังต่อไปนี้

- การทดสอบหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Gradation) โดยผ่านตะแกรงแบบไม่ล้าง (Dry Sieve) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท.204/2516
- การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.207/2517
- การหาค่าความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท.202/2515 จะต้องมีความสึกหรอไม่เกินร้อยละ 40
- การทดสอบค่าความทนทาน (Soundness) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท.213/2531 โดยใช้โซเดียมซัลเฟตจำนวน 5 รอบ ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ต้องไม่เกินร้อยละ 9
- การทดสอบค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท.210/2518 ค่าดัชนีความแบน ต้องไม่เกินร้อยละ 30
- การทดสอบดัชนีความยาว (Elongation Index) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท.211/2518 ต้องมีค่าดัชนีความยาวไม่เกินร้อยละ 30

2) วัสดุมวลละเอียด

เป็นหินฝุ่นหรือที่ผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) คุณสมบัติของวัสดุมวลละเอียดเป็นตัวกำหนดขนาดผลรวมที่ได้จากมวลรวมหยาบ โดยเป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวงซึ่งมีการแบ่งขั้นตอนการทดสอบดังนี้

- การทดสอบหาขนาดเม็ดวัสดุ (Gradation) โดยการร่อนผ่านตะแกรงแบบล้าง (Wet Sieve) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.205/2517
- การทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.209/2518
- การทดสอบความทนทาน (Soundness) โดยใช้โซเดียมซัลเฟตจำนวน 5 รอบ ส่วนที่ไม่คงทน (Loss) ต้องไม่เกินร้อยละ 9
- การทดสอบหาค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.203/2515 จะต้องมียค่า Sand Equivalent ไม่น้อยกว่าร้อยละ 30

3.4 แอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic Concrete)

เป็นวัสดุที่มีความสำคัญอย่างมากสำหรับผิวจราจรแบบยืดหยุ่น (Flexible Pavement) เพราะด้วยวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic Concrete) จะมียางแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) เป็นตัวยึดประสานให้มวลรวมยึดเกาะกันให้มีความแน่นและแข็งแรงจนสามารถรับน้ำหนักบรรทุกจากผิวจราจรได้และมีความยืดหยุ่นกับสภาพอากาศของประเทศไทย จึงต้องมีการคำนวณ และออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphaltic Concrete) ให้มีความถูกต้องและเหมาะสมกับชนิดของมวลรวม

การออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตได้จากวัสดุ 2 ชนิด คือวัสดุมวลรวมและแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) โดยวัสดุมวลรวมที่นำมาใช้นั้นได้จากการทดสอบและคำนวณหาขนาดเม็ดของวัสดุ (Gradation) โดยผ่านตะแกรงแบบล่างและแบบไม่ล่างตามหัวข้อ 3.3 (การวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำหนักวัสดุมวลรวมเท่ากับ 1,200 กรัม) เมื่อได้วัสดุมวลรวมแล้วนำวัสดุมวลรวมไปอบให้มีความร้อนไม่น้อยกว่า 160 องศาเซลเซียส (± 5 องศาเซลเซียส) เพราะเพื่ออุณหภูมิบดอัดที่ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นผสมมวลรวมให้เข้ากันแล้วทำการใส่แอสฟัลต์ซีเมนต์ตามที่ออกแบบโดยแอสฟัลต์ซีเมนต์ต้องมีความหนืดที่ 170 เซนติคโตส แล้วทำการผสมโดยเร็วให้เข้ากันในเวลา 50 - 60 วินาที จากนั้นทำการบดอัดทันทีในแบบโมลมาตรฐาน (แบบโมลต้องมีความร้อนอยู่ที่ 150 องศาเซลเซียส) โดยการวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ปริมาณการจราจรชนิดหนาแน่นและชั้นทาง Wearing Course จะได้จำนวนการบดอัดที่ 75 ครั้ง จำนวน 2 หน้า โดยใช้ค้อนหนัก 10 ปอนด์ระยะตกกระทบ 18 นิ้ว เมื่อบดอัดเสร็จนำตัวอย่างทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องแล้วดันตัวอย่างออก เมื่อได้ตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตแล้ว นำตัวอย่างไปชั่งในอากาศ ในน้ำ และชั่งในอากาศแบบอิมตัวผิวแห้ง จากนั้นนำตัวอย่างไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 30 - 40 นาที แล้วนำตัวอย่างไปทดสอบหาค่าการไหลและค่าเสถียรภาพด้วยเครื่องทดสอบแบบมาร์แชลล์ โดยสามารถแยกเป็นหัวข้อการทดสอบได้ดังนี้

- 1) ปริมาณยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) ที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 4.0 4.5 5.0 5.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม
- 2) ทดสอบหาค่าเสถียรภาพแบบมาร์แชลล์ และการเคลื่อนตัวโดยบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ และ อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.604/2517
- 3) ทดสอบหาค่าดัชนีความแข็งแรง (Strength Index) ของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตามมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล.-ท.413/2544

3.5 วัสดุผสมเพิ่ม

เมื่อได้ค่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมแล้ว จากนั้นจะทำการผสมเพิ่มด้วยวัสดุผสมเพิ่มที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้มีอยู่ 3 ชนิดได้แก่

- 1) ปูนซีเมนต์ (Cement) ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง
- 2) ฝุ่นหิน (Rock Dust) โดยนำฝุ่นหินที่เหลือจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต

ตำบลโคกกรวด อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา

- 3) เถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ที่นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ จังหวัดลำปาง

โดยวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิดจะทำการทดสอบดังต่อไปนี้

- 1) ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง (Specific Gravity Hydraulic Cement)

- 2) ทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของฝุ่นหิน (Rock Dust) และเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) ตามมาตรฐานการทดสอบของกรมทางหลวง ที่ ทล.-ท. 209/2518

- 3) ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ ที่ใช้ในการทดสอบเท่ากับ 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม

- 4) ทดสอบหาค่าเสถียรภาพแบบมาร์แชลล์ และการเคลื่อนตัวโดยบ่มตัวอย่างที่อุณหภูมิปกติ และ อุณหภูมิทดสอบ 60 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงที่ ทล.-ท. 604/2517

- 5) เมื่อได้ปริมาณการผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดสอบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus)

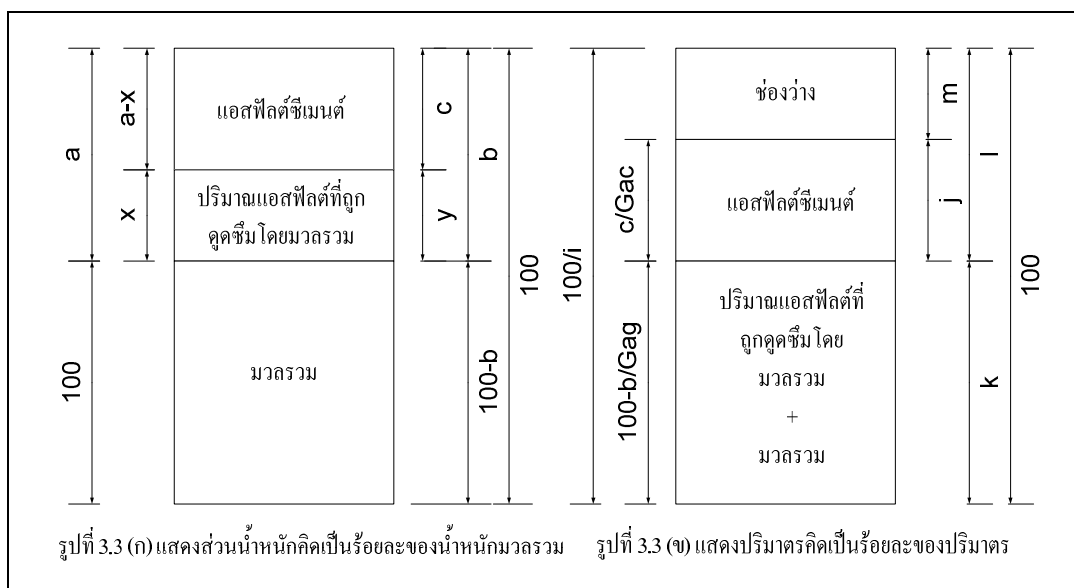


รูปที่ 3.2 เครื่องมือทดสอบค่าโมดูลัสด้านทาน โดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

เมื่อได้ค่าเปอร์เซ็นต์ค้ำของขนาดเม็ดวัสดุรวมแล้ว ทำการหาอัตราส่วนผลรวมในการใช้ออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตโดยดูค่าที่ได้ให้อยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนด จากนั้นให้นำอัตราส่วนผลรวมที่ได้มาทดสอบหาจำนวนแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อเป็นเกณฑ์ในการออกแบบ โดยดูข้อมูลที่ได้จากการเขียนลงกราฟ

เมื่อได้ขนาดผลรวมจะใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ผสมเพิ่มตามที่ออกแบบไว้ซึ่งสามารถอธิบายถึงลักษณะของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.3 แสดงส่วนน้ำหนักคิดเป็นร้อยละของมวลรวมและปริมาตรคิดเป็นร้อยละของปริมาตร

รูปที่ 3.3(ก) เป็นการแสดงส่วนน้ำหนักก่อนแอสฟัลต์คอนกรีตคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักมวลรวม กำหนดให้ด้านซ้ายแสดงถึงน้ำหนักมวลรวมเท่ากับ 100 โดย a เป็นน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์รวมกับปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวม และ x เป็นน้ำหนักแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวม ส่วนด้านขวาแสดงถึงร้อยละของน้ำหนักทั้งหมด กำหนดให้ b เป็นร้อยละของน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์รวมกับร้อยละปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวม ให้ c เป็นร้อยละน้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ และ y เป็นร้อยละน้ำหนักแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวม

รูปที่ 3.3(ข) เป็นการแสดงปริมาตรก่อนแอสฟัลต์คอนกรีต กำหนดให้ด้านซ้ายแสดงถึงปริมาตรทั้งหมดกำหนดให้เป็น $100/i$ โดย $100-b/G_{ac}$ เป็นปริมาตรของปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวมกับมวลรวม และ c/G_{ac} เป็นปริมาตรแอสฟัลต์ซีเมนต์ ส่วนด้านขวาแสดงถึงร้อยละของปริมาตรทั้งหมด กำหนดให้ k เป็นร้อยละปริมาตรของปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวมกับมวลรวม ให้ l เป็นร้อยละปริมาตรช่องว่างกับแอสฟัลต์ซีเมนต์ ให้ j เป็นร้อยละปริมาตรของแอสฟัลต์ซีเมนต์ และ m เป็นร้อยละปริมาตรช่องว่าง

- เมื่อ
- a = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ใช้ผสม (เปอร์เซ็นต์โดยมวลของวัสดุมวลรวม)
 - x = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวม (เปอร์เซ็นต์โดยมวลของวัสดุมวลรวม)
 - y = ร้อยละของปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยมวลรวม
 - i = ความหนาแน่นของแอสฟัลต์คอนกรีต (กรัมต่อมิลลิกรัม)

จากรูปที่ 3.3 สามารถคำนวณได้สูตรสำคัญสำหรับหาค่าการวิเคราะห์ข้อมูลโดยสมการที่ (3.1) บอกถึงสูตรการหาค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะของมวลรวม สมการที่ (3.2) เป็นสมการหาเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์โดยมวลของวัสดุมวลรวม สมการที่ (3.3) เป็นสมการหาค่าความถ่วงจำเพาะโดยรวม สมการที่ (3.4) เป็นสมการหาปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยวัสดุมวลรวม สมการที่ (3.5) เป็นสมการหาปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลของแอสฟัลต์คอนกรีต สมการที่ (3.6) เป็นสมการหาปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต สมการที่ (3.7) เป็นสมการหาปริมาตรของวัสดุมวลรวมโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต สมการที่ (3.8) เป็นการหาปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมโดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต และสมการที่ (3.9) เป็นการหาปริมาตรช่องว่างอากาศคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต จากสมการที่กล่าวมาสามารถแสดงสูตรการคำนวณได้ดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะมวลรวม (Average Specific Gravity Blend)

$$G_{ag} = \frac{100}{\left[\frac{P_F}{G_F} + \frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \frac{P_3}{G_3} + \frac{P_4}{G_4} \right]} \quad (3.1)$$

- เมื่อ G_{ag} = ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะมวลรวม
 P_F = ปริมาณวัสดุผสมแทรก (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุมวลรวม)
 P_1 = ปริมาณวัสดุมวลรวมหินฝุ่น (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุมวลรวม)
 P_2 = ปริมาณวัสดุมวลรวมหิน 3/8 นิ้ว (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุมวลรวม)
 P_3 = ปริมาณวัสดุมวลรวม 1/2 นิ้ว (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุมวลรวม)
 P_4 = ปริมาณวัสดุมวลรวม 3/4 นิ้ว (เปอร์เซ็นต์โดยมวลวัสดุมวลรวม)
 G_F = ความถ่วงจำเพาะวัสดุผสมแทรก
 G_1 = ความถ่วงจำเพาะวัสดุมวลรวมหินฝุ่น
 G_2 = ความถ่วงจำเพาะวัสดุมวลรวม 3/8 นิ้ว
 G_3 = ความถ่วงจำเพาะวัสดุมวลรวม 1/2 นิ้ว
 G_4 = ความถ่วงจำเพาะวัสดุมวลรวม 3/4 นิ้ว

ปริมาณแอสฟัลต์เป็นเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์โดยมวลของวัสดุรวม (% Asphalt by Mass of Mix)

$$b = \frac{100a}{(100 + a)} \quad (3.2)$$

เมื่อ b = ปริมาณแอสฟัลต์ (เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์โดยมวลของวัสดุรวม)

ค่าความถ่วงจำเพาะ โดยรวม (Virtual Specific Gravity)

$$G_v = \frac{(100 - b)}{\left[\frac{100}{G_m} - \frac{b}{G_{ac}} \right]} \quad (3.3)$$

เมื่อ G_v = ค่าความถ่วงจำเพาะ โดยรวม

G_m = Theoretical Maximum Specific Gravity

G_{ac} = ค่าความถ่วงจำเพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์

ปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยวัสดุรวมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลของวัสดุรวม

(Asphalt Lost by Absorption, A_{ac})

$$x = 100 \frac{(G_v - G_{ag})}{(G \times G_{ag})} G_{ac} \quad (3.4)$$

เมื่อ x = ปริมาณแอสฟัลต์ที่ถูกดูดซึมโดยวัสดุรวม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดย มวลของวัสดุรวม)

ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลของแอสฟัลต์คอนกรีต

(% Effective Asphalt Cement by Mass of Mix)

$$c = b - \frac{x(100-b)}{100} \quad (3.5)$$

เมื่อ c = ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยมวลของแอสฟัลต์คอนกรีต)

ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต

(% Volume of Effective Asphalt Cement by Volume of Mix)

$$j = \frac{c \times i}{G_{ag}} \quad (3.6)$$

เมื่อ j = ปริมาณแอสฟัลต์ประสิทธิภาพ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต)

ปริมาตรของวัสดุมวลรวมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต

(% Volume of Aggregate by Volume of Mix)

$$k = \frac{(100-b)i}{G_{ag}} \quad (3.7)$$

เมื่อ k = ปริมาตรของวัสดุมวลรวม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต)

ปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต

(% Voids in the Mineral Aggregate by Volume of Mix)

$$l = 100 - k \quad (3.8)$$

เมื่อ l = ปริมาตรช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต)

ปริมาตรช่องว่างอากาศเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต
(% Air Voids by Volume of Mix)

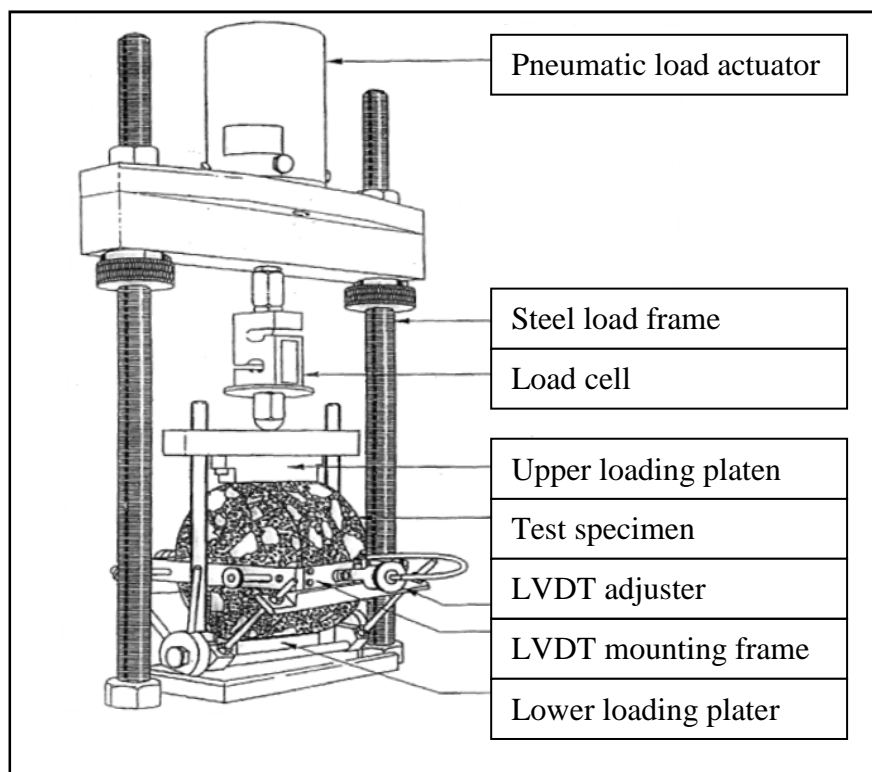
$$m = l - j \quad (3.9)$$

เมื่อ m = ปริมาตรช่องว่างอากาศ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของแอสฟัลต์คอนกรีต)

จากสมการที่ได้สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์โดยเขียนลงกราฟระหว่าง แอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) กับ ค่าความหนาแน่น (Density) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ (%Air Voids) ค่าการไหล (Flow) ค่าเสถียรภาพ (Stability) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ (%Voids Filled with Bitumen, VFB.) และค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (%Voids in Mineral Aggregate, VMA.) จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากกราฟโดยใช้มาตรฐานกรมทางหลวงชนัดการจราจรหนาแน่นและชั้นทาง Wearing Course ตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม408/2532

เมื่อได้ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มจากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีมาร์แชลล์ที่เหมาะสมแล้ว จะนำแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาและที่ผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิดมาทดสอบหาค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus) เพื่อทดสอบค่าในการต้านทานกำลังแรงดึงทางอ้อม โดยมีลักษณะการทดสอบดังรูปที่ 3.4

การทดสอบจะนำก้อนตัวอย่างที่ออกแบบแบบมาร์แชลล์ มาอบที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ประมาณ 60 - 90 นาที จากนั้นนำตัวอย่างไปประกอบในเครื่องทดสอบ แล้วตรวจสอบ LVDT ว่าอยู่ในตำแหน่งทดสอบหรือไม่ ถ้าไม่ให้ทำการปรับแก้ เพราะ LVDT เป็นตัววัดค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม จากนั้นปล่อยโหลดทดสอบโดยเครื่องคอมพิวเตอร์จะทำการคำนวณหาแรงที่เหมาะสมต่อก้อนตัวอย่างแล้วแสดงผลทางรูปกราฟ เมื่อได้แรงที่เหมาะสมแล้วคอมพิวเตอร์จะทำการปล่อยโหลดมาอย่างน้อย 5 ครั้ง ซึ่งการทดสอบแต่ละครั้งจะใช้ 2 ด้าน เพื่อนำค่าที่ได้มาเฉลี่ย โดยผลทดสอบได้จากสูตรการคำนวณที่ 3.10



รูปที่ 3.4 แสดงลักษณะการทดสอบแบบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม
(ห้องทดสอบวัสดุการทางมหาวิทยาลัยนเรศวร)

ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus (S_m) in MPa)

$$S_m = \frac{L}{(D \times t)} \times (v + 0.27) \quad (3.10)$$

เมื่อ S_m = ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

L = แรงกระทำในแนวดิ่ง (นิวตัน)

D = เส้นผ่านศูนย์กลางกึ่งกลางก้อนตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต (มม.)

t = ความหนาของก้อนตัวอย่าง (มม.)

v = ค่าอัตราส่วน (Poisson's ration) ของอนุกรมทดสอบ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูลและการอภิปรายผล

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดสอบที่ได้จากห้องปฏิบัติการโดยการนำปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหิน (Rock Dust) และเถ้าลอยลิกไนต์ (Fly Ash) มาเป็นวัสดุผสมเพิ่ม ว่าอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดตามวัตถุประสงค์ที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 พร้อมทั้งค่าใช้จ่ายของวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิด

4.1 ผลการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70)

การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) ซึ่งจะใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาปริมาตรของแอสฟัลต์ซีเมนต์แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าความถ่วงจำเพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ

| รายการทดสอบ | ค่าที่วัดได้ | หน่วย |
|---|--------------|-------------|
| ค่าความถ่วงจำเพาะแอสฟัลต์ซีเมนต์ (AC 60 - 70) | 1.03 | - |
| เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำ | 0.25 | เปอร์เซ็นต์ |

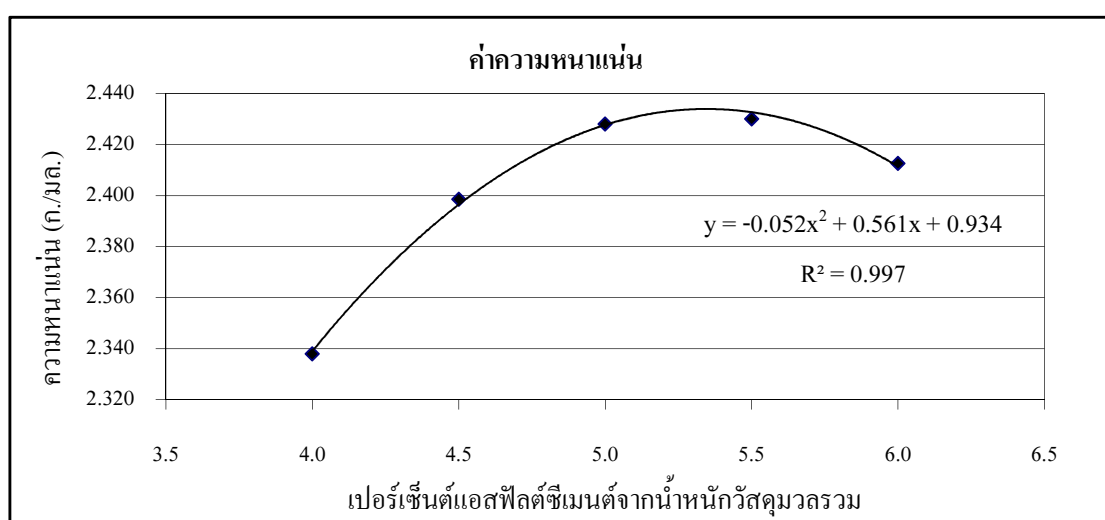
4.2 ผลการทดสอบมวลรวม

มวลรวมที่ได้นำมาจากโรงไม้หิน ตำบลหนองน้ำแดง อำเภอปากช่อง จังหวัดนครราชสีมา โดยผ่านการเผาจาก โรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ตำบลโคกกรวด จังหวัดนครราชสีมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด รูปที่ 4.1 แสดงผลการทดสอบขนาดคละรวมที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงของวัสดุมวลรวมแต่ละขนาด ข้อมูลนี้นำมาคำนวณเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกให้ได้แอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมตามข้อกำหนด จากนั้นจะนำวัสดุมวลรวมมาทดสอบตามมาตรฐานที่กำหนด ซึ่งทำการทดสอบที่ห้องปฏิบัติการวัสดุการทาง (F5) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรม กรมทางหลวงที่ 8 ตารางที่ 4.2 แสดงผลการทดสอบมวลรวมที่ใช้ในการวิจัยนี้

4.3 ผลการทดสอบการเลือกปริมาณยางในแอสฟัลต์คอนกรีต

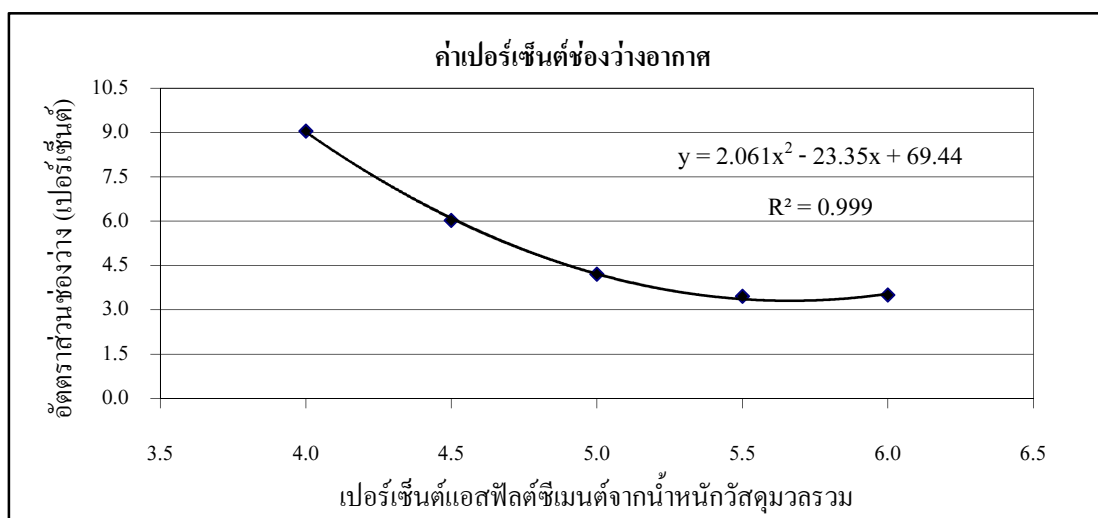
เมื่อนำยางแอสฟัลต์ซีเมนต์มาผสมในมวลรวมที่มีคุณสมบัติตามตารางที่ 4.2 (ตรงตามมาตรฐานกรมทางหลวง) ทำการผสมแอสฟัลต์ซีเมนต์ในอัตราส่วน 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ โดยใช้ตัวอย่างละ 5 ก้อน เลือกก้อนที่เหมาะสมมา 3 ก้อนเพื่อเฉลี่ยผลทดสอบ และทดสอบด้วยเครื่องทดสอบมาร์แชลล์ ตามขั้นตอนในบทที่ 3 จากนั้นนำผลทดสอบมาแสดงความสัมพันธ์ในรูปกราฟ

โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้เส้นแนวโน้มแบบพหุนามลำดับที่ 2 สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ได้ผลของการทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.2 ถึงรูปที่ 4.7



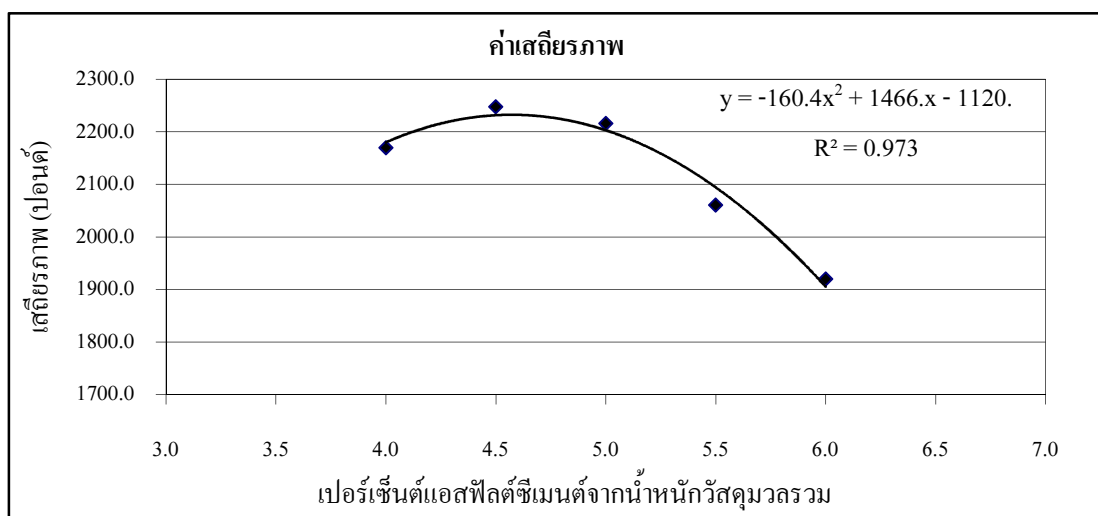
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.2 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ ซึ่งผลการทดสอบจะพบว่า การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในช่วง 4.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์นั้น ความหนาแน่นจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์สามารถเคลือบวัสดุรวมได้ดี แต่เมื่อมีปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นถึงระดับหนึ่ง แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถเคลือบวัสดุรวมได้เพิ่มอีก ทำให้ความหนาแน่นลดลง จึงได้สมการ $y = -0.0525x^2 + 0.561x + 0.9346$ เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าความหนาแน่นอยู่ที่ 2.418 กรัมต่อมิลลิกรัม



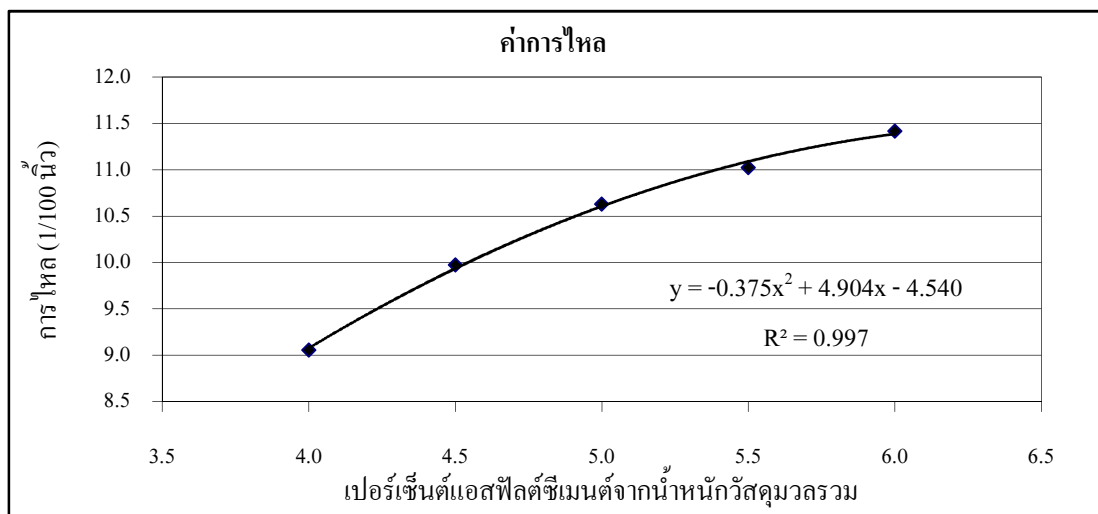
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.3 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การที่เพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 4.0 ถึง 5.5 เปอร์เซ็นต์ค่าอัตราส่วนช่องว่างจะลดลงตามลำดับ และอัตราส่วนช่องว่างจะเริ่มคงที่เพราะแอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถเคลือบวัสดุรวมได้เพิ่มอีกโดยมีความสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่น จึงได้สมการ $y = 2.0618x^2 - 23.356x + 69.449$ เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศอยู่ที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ (ข้อกำหนดอยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์)



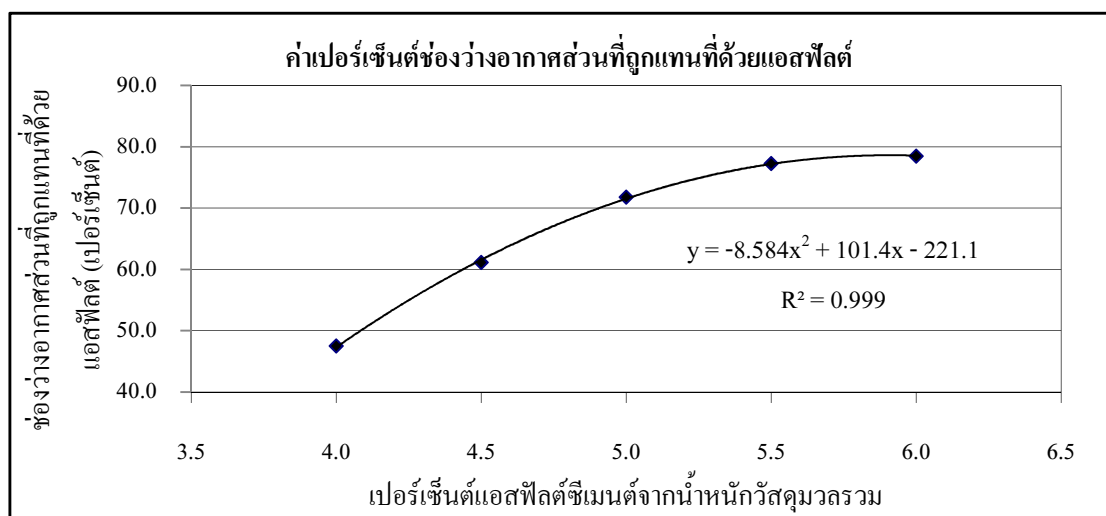
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.4 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในช่วง 4.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์คอนกรีตจะมีเสถียรภาพที่ดีเพราะปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบวัสดุรวมได้เหมาะสม แต่เมื่อเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์เพิ่มขึ้นจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบวัสดุรวมมากเกินไปทำให้ค่าเสถียรภาพลดลง จึงได้สมการ $y = -160.42x^2 + 1466.8x - 1120.5$ เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าเสถียรภาพอยู่ที่ 2,224 ปอนด์ (ข้อกำหนดไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์)



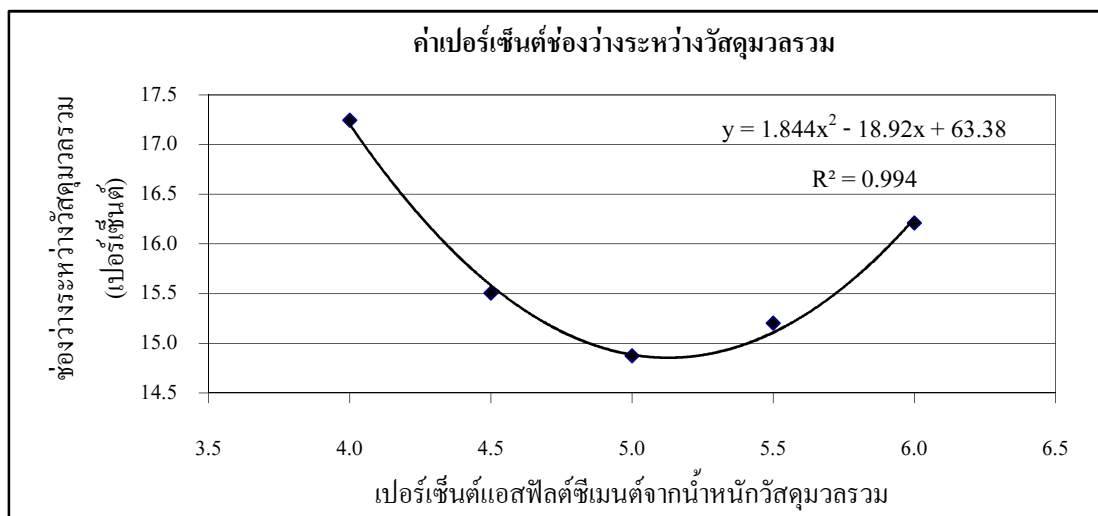
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.5 เป็นการแสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ในวัสดุรวมช่วง 4.0 ถึง 6.0 เปอร์เซ็นต์นั้นจะมีค่าการไหลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะแอสฟัลต์ซีเมนต์จะช่วยเพิ่มการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีต จึงได้สมการ $y = -0.375x^2 + 4.9044x - 4.5407$ เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าการไหลอยู่ที่ 10 (0.01 นิ้ว) (ข้อกำหนดอยู่ระหว่าง 8-16 (0.01 นิ้ว))



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.6 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ซึ่งผลการทดสอบพบว่า การที่เพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 4.0 ถึง 5.5 เปอร์เซ็นต์ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์จะเพิ่มขึ้นตามลำดับ และจะเริ่มคงที่เมื่อปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์อยู่ที่ 6.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะแอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถเคลือบวัสดุรวมได้เพิ่มอีกโดยมีความสัมพันธ์กับค่าอัตราส่วนช่องว่าง จึงได้สมการ $y = -8.5849x^2 + 101.45x - 221.11$ เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์อยู่ที่ 68.1 เปอร์เซ็นต์



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับ
เปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์จากการทดสอบพบว่า ช่วงการเพิ่มปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 4.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์ ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมจะลดลงเพราะแอสฟัลต์ซีเมนต์จะช่วยการยึดเกาะระหว่างวัสดุมวลรวมได้ดีขึ้น แต่ถ้าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบวัสดุมวลรวมมากเกินไปทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมเพิ่มขึ้นเนื่องจากแอสฟัลต์ซีเมนต์จะดันให้วัสดุมวลรวมห่างกัน จึงได้สมการ $y = 1.844x^2 - 18.924x + 63.384$ เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะได้ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมอยู่ที่ 15 เปอร์เซ็นต์ (ข้อกำหนดไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์)

การพิจารณาเลือกสัดส่วนแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสม จะต้องพิจารณาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 6 ประการให้ตรงตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม408/2532 ชั้นทาง Wearing Course การศึกษาเลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเหมาะสมและอยู่ในเกณฑ์ข้อกำหนดเนื่องจาก ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศมีผลทดสอบเท่ากับ 4.8 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในข้อกำหนด (อยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,224 ปอนด์ (ไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าการไหลเท่ากับ 10 1/100 นิ้ว อยู่ในข้อกำหนด (อยู่ระหว่าง 8-16 1/100 นิ้ว) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ (ไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ดังแสดงในตารางที่

ตารางที่ 4.3 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์

| การทดสอบ | หน่วย | ผลทดสอบ | มาตรฐาน |
|---|------------------|---------|-------------------|
| ค่าความหนาแน่น | กรัมต่อมิลลิเมตร | 2.418 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ | เปอร์เซ็นต์ | 4.8 | 3 - 5 |
| ค่าเสถียรภาพ | ปอนด์ | 2,224 | ไม่น้อยกว่า 1,800 |
| ค่าการไหล | 1/100 นิ้ว | 10 | 8 - 16 |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ | เปอร์เซ็นต์ | 68.1 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุ มวลรวม | เปอร์เซ็นต์ | 15 | ไม่น้อยกว่า 14 |

4.4 ผลการทดสอบวัสดุผสมเพิ่ม

ผลการทดสอบวัสดุผสมเพิ่มซึ่งประกอบด้วย ซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ แสดงดังตารางที่ 4.4 (ค่าความถ่วงจำเพาะ) และตารางที่ 4.5 (ค่าการร่อนผ่านตะแกรง) จากนั้นทำการทดสอบหาคุณสมบัติทางเคมีและคุณลักษณะของรูปร่างวัสดุผสมแทรกทั้ง 3 ชนิดทำการทดสอบที่ห้องทดสอบวัสดุการทาง (F5) และฝ่ายวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ (F1) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.4 ผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ

| ชนิด | ค่าความถ่วงจำเพาะ |
|--|-------------------|
| ซีเมนต์ ที่อุณหภูมิ 27 องศาเซลเซียส | 3.150 |
| ฝุ่นหิน ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส | 2.719 |
| เถ้าลอยลิกไนต์ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส | 2.441 |

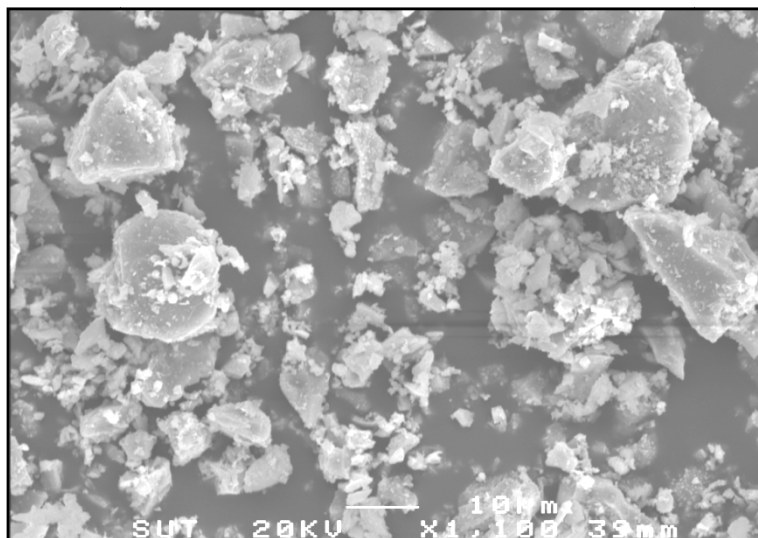
ตารางที่ 4.5 ผลทดสอบการร่อนผ่านตะแกรง

| ตะแกรง | เปอร์เซ็นต์ผ่าน | | |
|--------|-----------------|---------|----------------|
| | ซีเมนต์ | ฝุ่นหิน | เถ้าลอยลิกไนต์ |
| #30 | 100.0 | 100.0 | 100.0 |
| #50 | 99.3 | 100.0 | 99.5 |
| #100 | 90.0 | 97.9 | 93.7 |
| #200 | 71.5 | 85.7 | 76.7 |

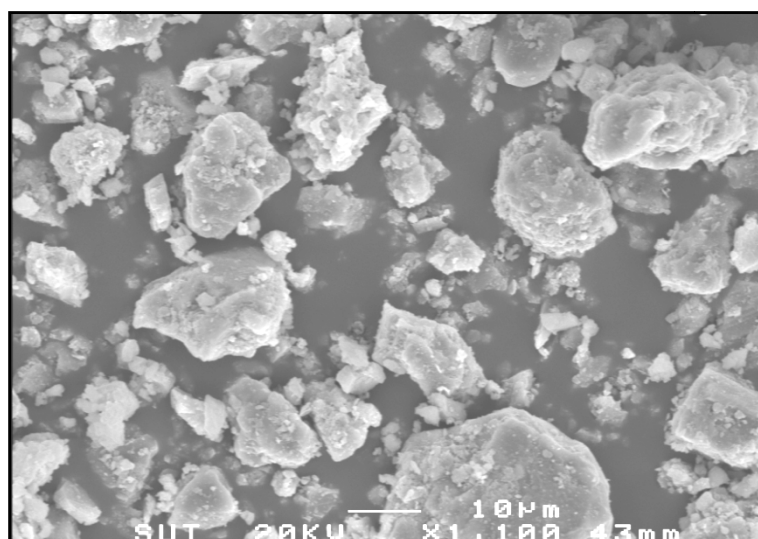
ตารางที่ 4.6 คุณสมบัติทางเคมีของซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์

| องค์ประกอบทางเคมี (%) | ซีเมนต์ | ฝุ่นหิน | เถ้าลอยลิกไนต์ |
|--|---------|---------|----------------|
| แคลเซียมออกไซด์ (CaO) | 76.16 | 92.35 | 10.03 |
| ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO ₂) | 7.81 | 1.05 | 20.08 |
| แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) | 1.37 | 0.00 | 1.27 |
| อะลูมิเนียมไดออกไซด์ (Al ₂ O ₃) | 1.09 | 0.34 | 44.13 |
| ไอรอนออกไซด์ (Fe ₂ O ₃) | 2.15 | 0.36 | 2.01 |
| ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO ₃) | 0.85 | 0.49 | 0.21 |
| โซเดียมออกไซด์ (Na ₂ O) | 0.28 | 0.11 | 0.22 |
| โพแทสเซียมออกไซด์ (K ₂ O) | 2.06 | 0.22 | 2.17 |
| การสูญเสียเนื่องจากการเผาไหม้ (LOI) | 8.03 | 41.25 | 19.17 |

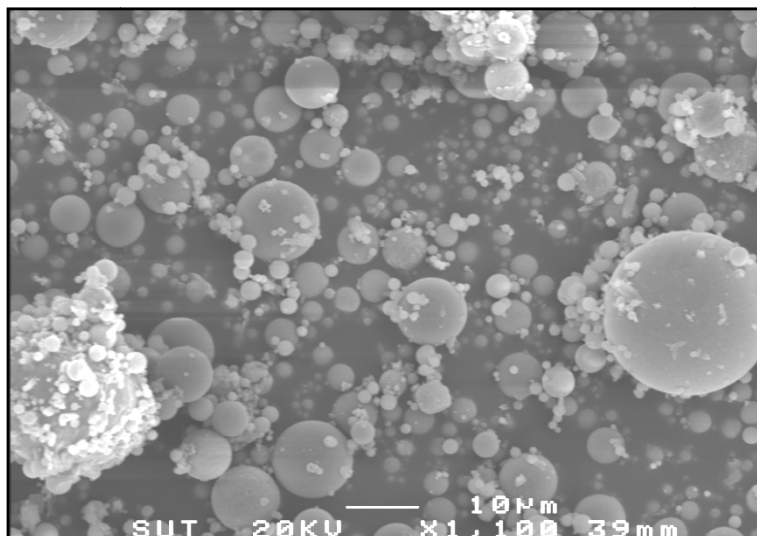
ปัจจัยที่มีผลต่อการรับกำลังอัดที่สำคัญได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) จะเห็นได้ว่า ซีเมนต์และฝุ่นหินมีปริมาณแคลเซียมออกไซด์ (CaO) มีอยู่ในปริมาณที่สูง สำหรับเถ้าลอยลิกไนต์จะมีซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) สูงเช่นกัน ดังนั้นซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ เมื่อนำมาเป็นวัสดุผสมเพิ่มจะช่วยให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นได้



รูปที่ 4.8 ลักษณะรูปร่างของซีเมนต์กำลังขยาย 1,100 เท่า



รูปที่ 4.9 ลักษณะรูปร่างของฝุ่นหินกำลังขยาย 1,100 เท่า



รูปที่ 4.10 ลักษณะรูปร่างของเถ้าลอยลิกไนต์กำลังขยาย 1,100 เท่า

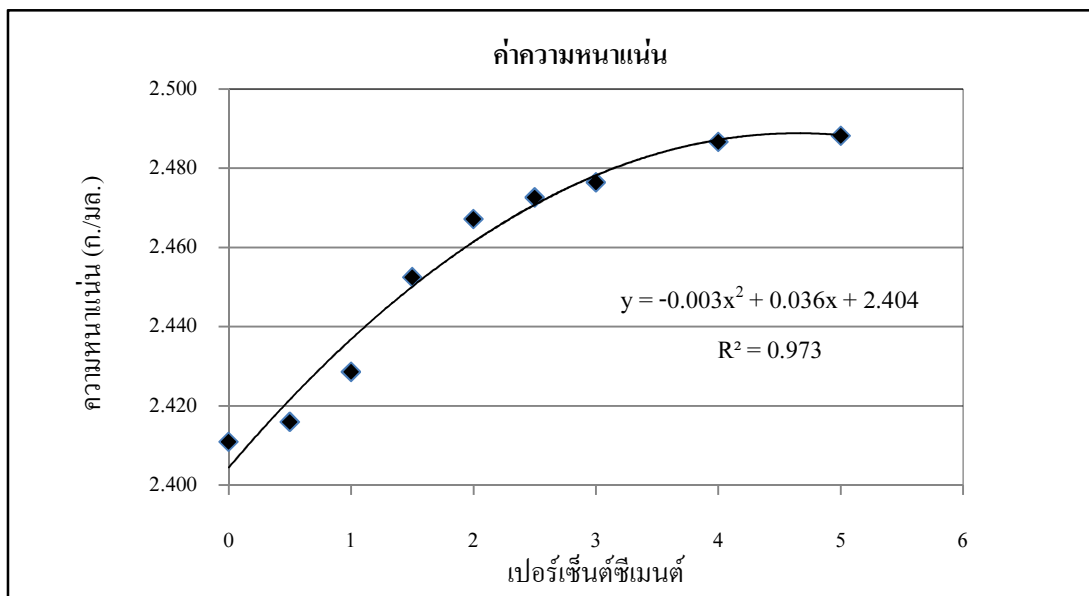
จากการทดสอบร่อนผ่านตะแกรงขนาดของฝุ่นหินจะมีความละเอียดมากกว่า ซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ทำให้พบว่าฝุ่นหินจะดูดซึมแอสฟัลต์ได้ดีเมื่อน้ำหนักที่เท่ากันพื้นผิวของฝุ่นหินจะมีมากกว่า ซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์

จากรูปการทดสอบ Scanning Electron Microscope จะเห็นว่าภาพการขยาย 1,100 เท่าของซีเมนต์จะมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและชั้น ส่วนฝุ่นหินจะมีลักษณะคล้ายซีเมนต์คือมีลักษณะเป็นเหลี่ยมและชั้นหลายชั้นเหมือนชั้นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์จะมีลักษณะกลม ทำให้พบว่าลักษณะของซีเมนต์และฝุ่นหินเมื่อนำไปผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตจะถูกแอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบได้มากกว่าเถ้าลอยลิกไนต์และด้วยลักษณะเหลี่ยมจะช่วยในการรับน้ำหนักได้ดีกว่าลักษณะกลมเพราะจะเคลื่อนตัวได้ยาก

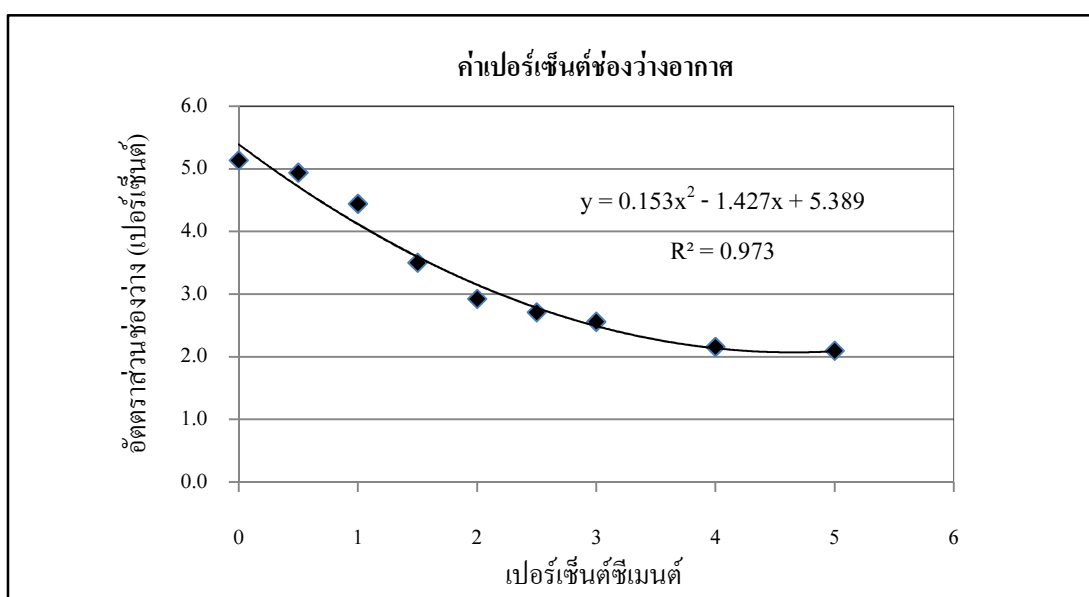
4.4.1 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์

จากนั้นทดสอบโดยใช้ซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นวัสดุผสมเพิ่มในอัตราส่วน 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 4.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์ ในแอสฟัลต์คอนกรีตที่ได้ค่าเปอร์เซ็นต์แอสฟัลต์ซีเมนต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักส่วนผสม

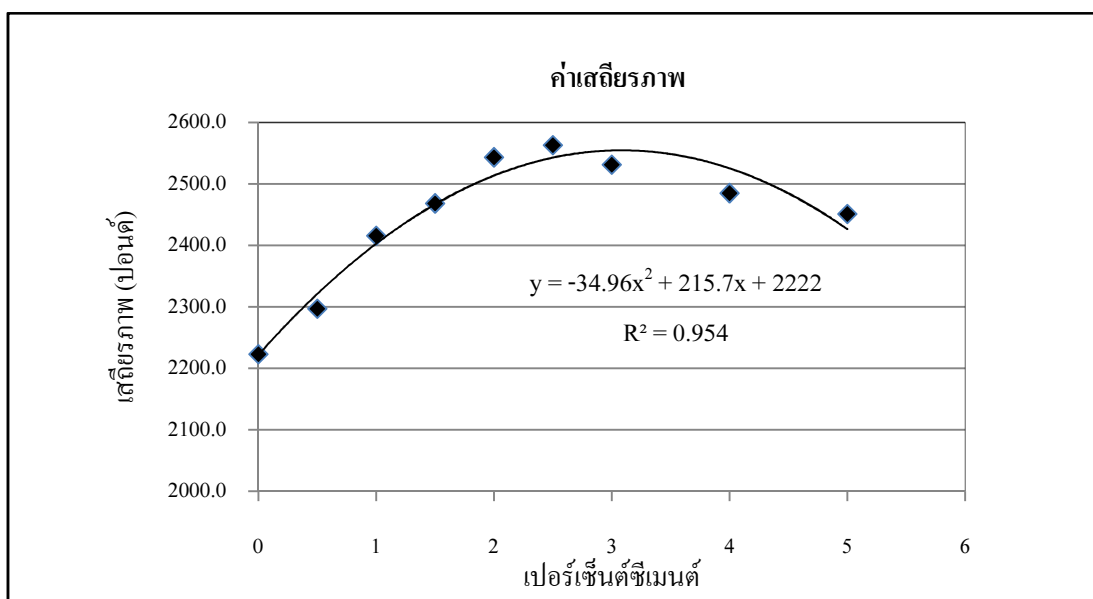
โดยผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.11 ถึง 4.16



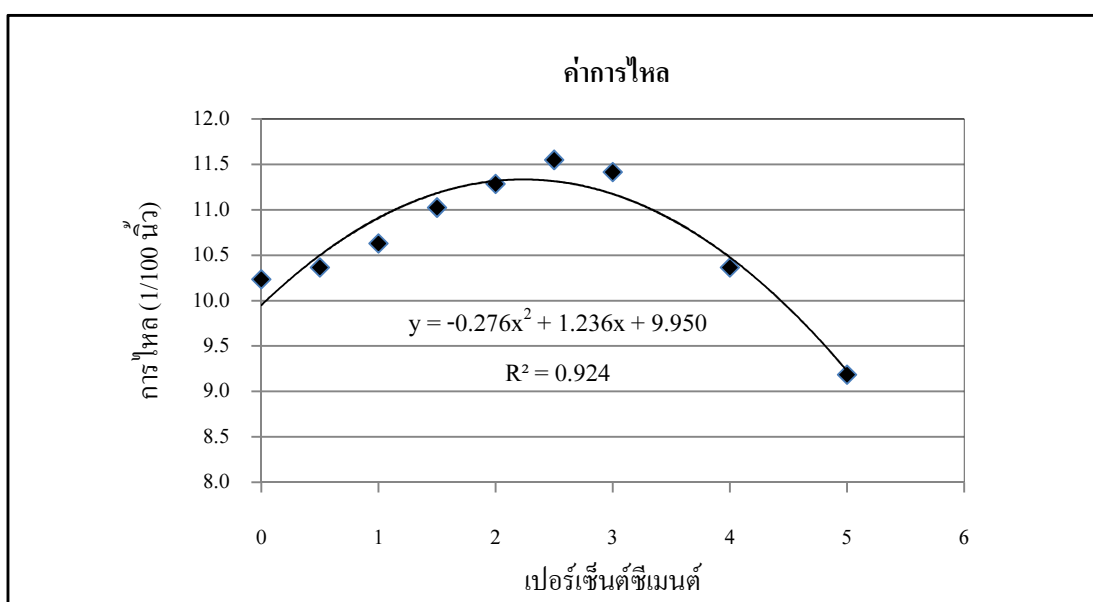
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซนต์ชีเมนต์



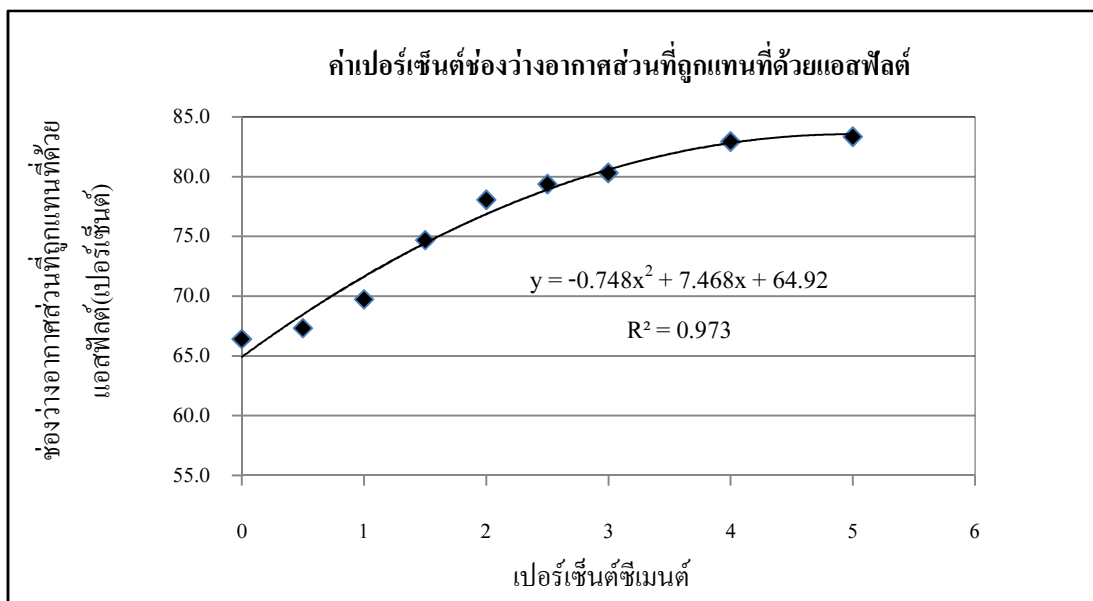
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซนต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซนต์ชีเมนต์



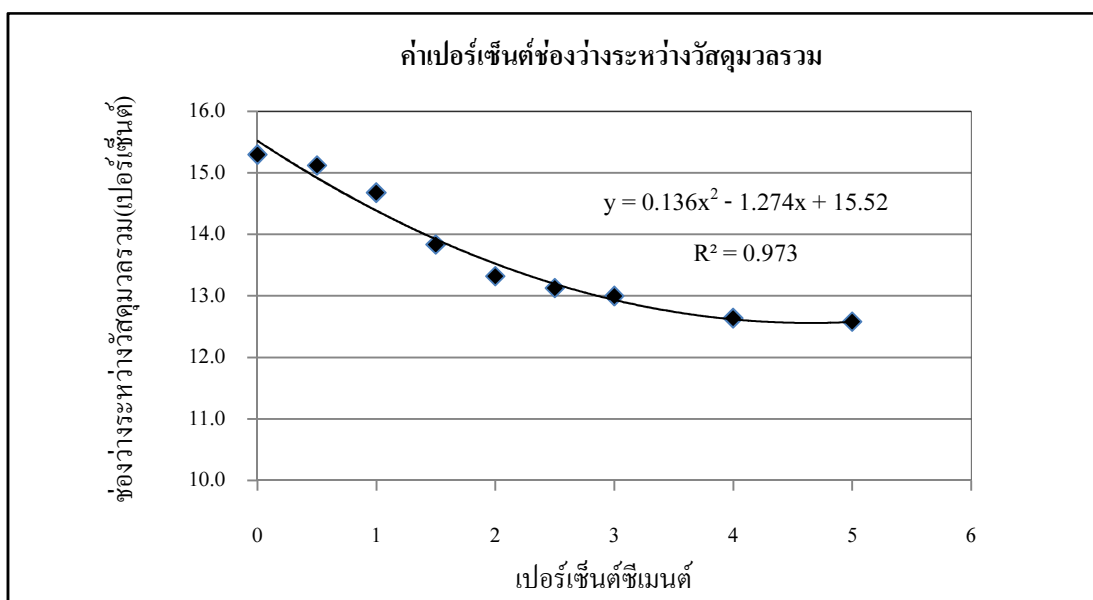
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับเปอร์เซ็นต์ซีเมนต์

ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์จะพบว่าเมื่อเพิ่มซีเมนต์ในช่วง 0.5 ถึง 4.0 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและเริ่มคงที่ในช่วง 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะซีเมนต์เริ่มที่จะอุดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไปทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถช่วยในการยึดเกาะวัสดุมวลรวมได้ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศจะลดลงเพราะซีเมนต์เข้าไปอุดแทรกช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีต ส่วนค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ และจะเริ่มลดลงเพราะซีเมนต์มีปริมาณที่มากเกินไปทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถช่วยในการยึดเกาะวัสดุมวลรวมได้ ส่วนค่าการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 3.0 เปอร์เซ็นต์ และจะเริ่มลดลงเพราะซีเมนต์มีปริมาณที่มากเกินไป ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ในช่วงผสม 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะซีเมนต์ที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์มีขนาดเล็กทำให้ไปแทนที่ช่องว่างอากาศ และค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องและเริ่มคงที่ในช่วงผสม 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะซีเมนต์ที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์เข้าไปอุดช่องว่างทำให้ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมลดน้อยลง

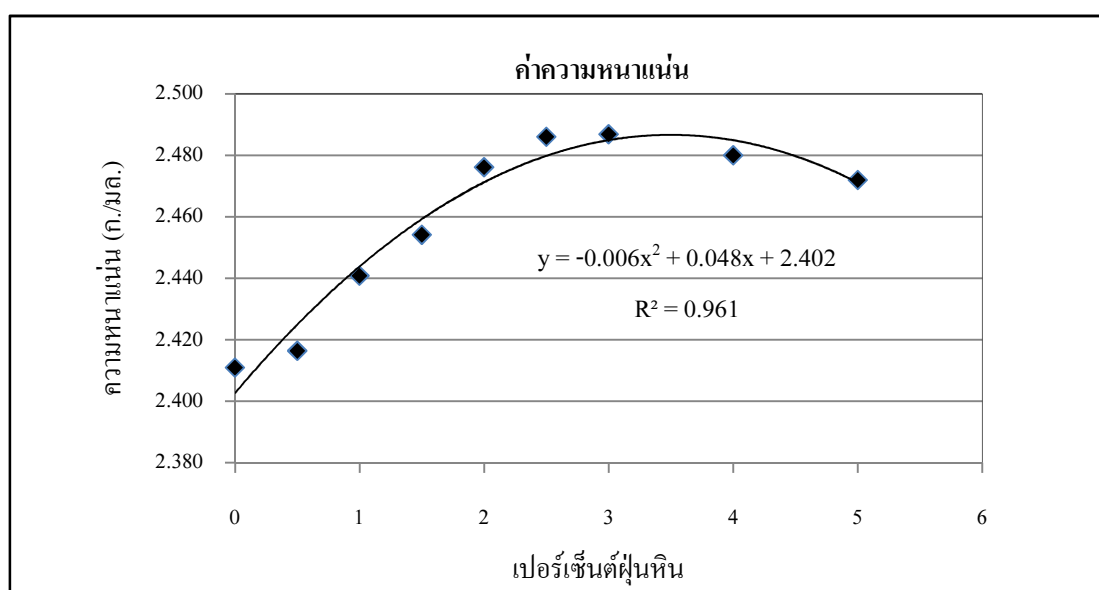
การทดสอบเลือกปริมาณส่วนผสมเพิ่มซีเมนต์ที่เหมาะสมนั้น จะดูความสามารถของค่าเสถียรภาพที่ดีขึ้นเพราะจะช่วยการรับน้ำหนักและลดการเกิดร่องล้อได้ดี แต่ค่าต่าง ๆ ต้องอยู่ในมาตรฐานด้วย พบว่าการใช้ซีเมนต์ผสมเพิ่มที่ 2 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเหมาะสม มีค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นได้ผลทดสอบเท่ากับ 2,514 ปอนด์ (ไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศลดน้อยลงมีผลทดสอบเท่ากับ 3.2 เปอร์เซ็นต์ อยู่ในข้อกำหนด (อยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) มีค่าการไหลเพิ่มขึ้นได้ผลทดสอบเท่ากับ 11.32 1/100 นิ้ว อยู่ในข้อกำหนด (อยู่ระหว่าง 8 - 16 1/100 นิ้ว) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมลดลงได้ผลทดสอบเท่ากับ 13.5 เปอร์เซ็นต์ (ไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งน้อยกว่ามาตรฐานอยู่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ในอัตราส่วน 2 เปอร์เซ็นต์

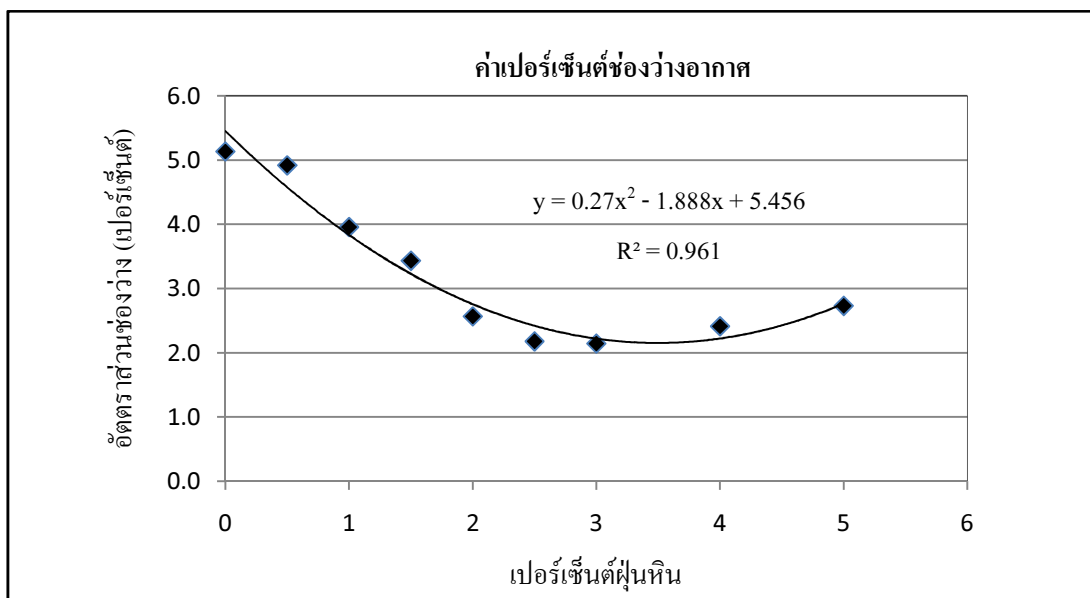
| การทดสอบ | หน่วย | ผลทดสอบ | มาตรฐาน |
|---|------------------|---------|-------------------|
| ค่าความหนาแน่น | กรัมต่อมิลลิลิตร | 2.462 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ | เปอร์เซ็นต์ | 3.2 | 3 - 5 |
| ค่าเสถียรภาพ | ปอนด์ | 2,514 | ไม่น้อยกว่า 1,800 |
| ค่าการไหล | 1/100 นิ้ว | 11.32 | 8 - 16 |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ | เปอร์เซ็นต์ | 76.9 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุ มวลรวม | เปอร์เซ็นต์ | 13.5 | ไม่น้อยกว่า 14 |

4.4.2 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหิน

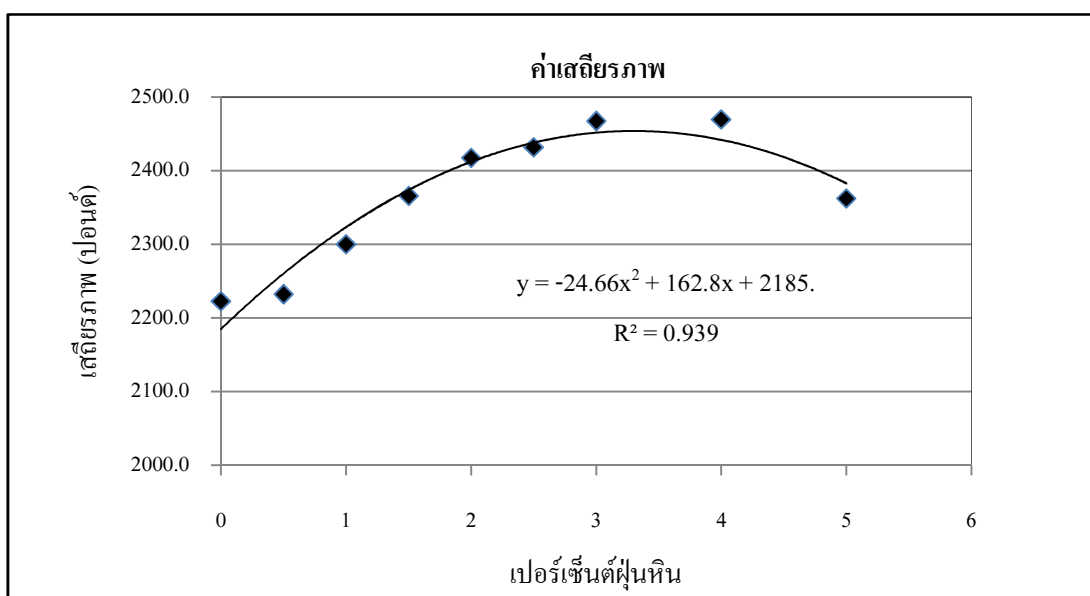
ผลการทดสอบโดยการผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.17 ถึง 4.22



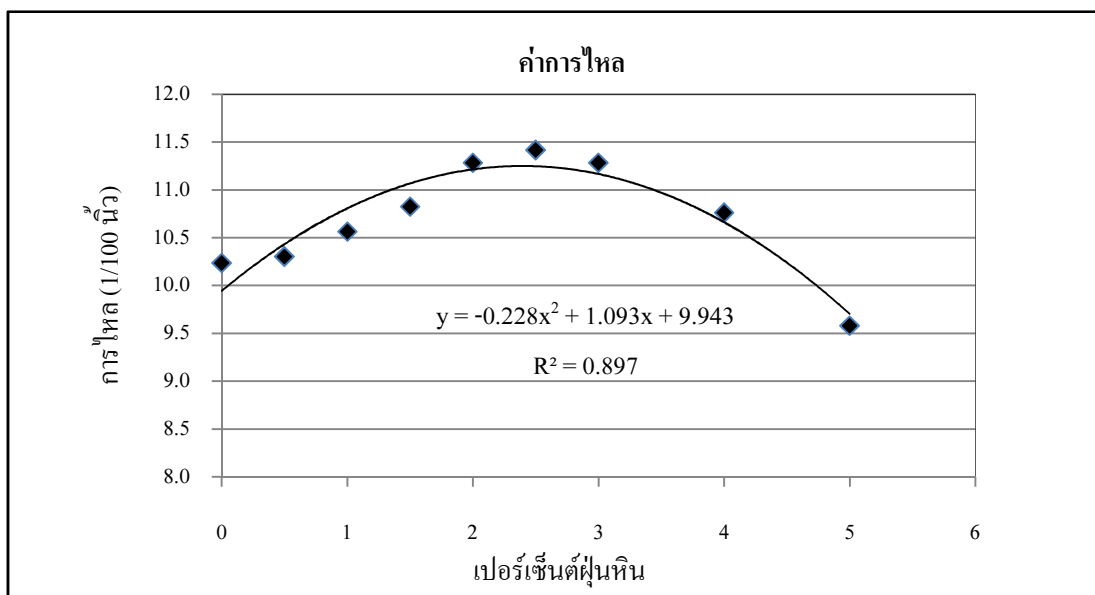
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน



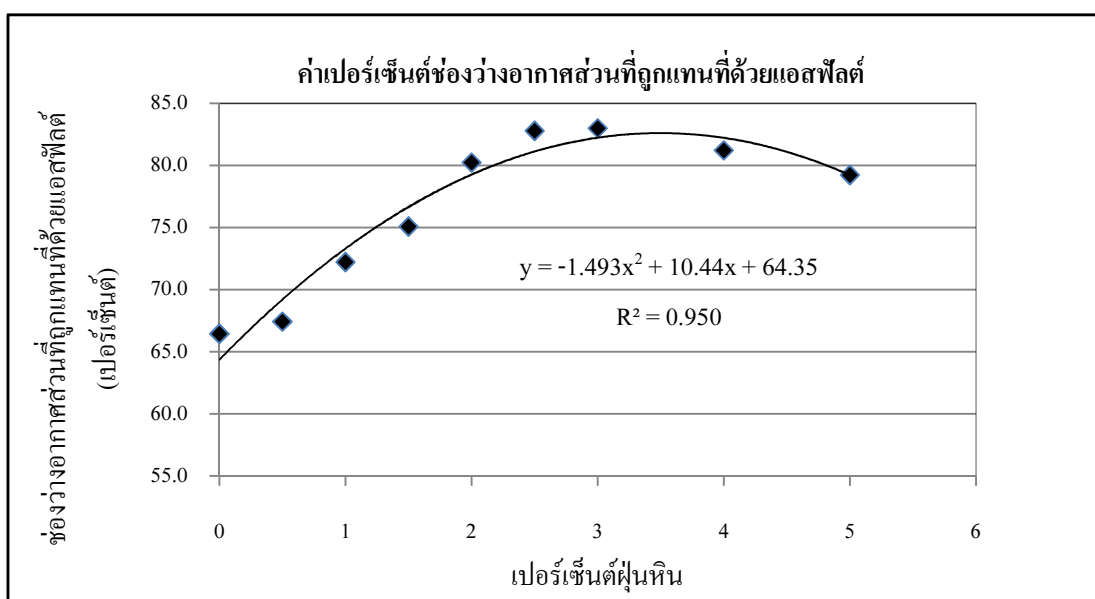
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน



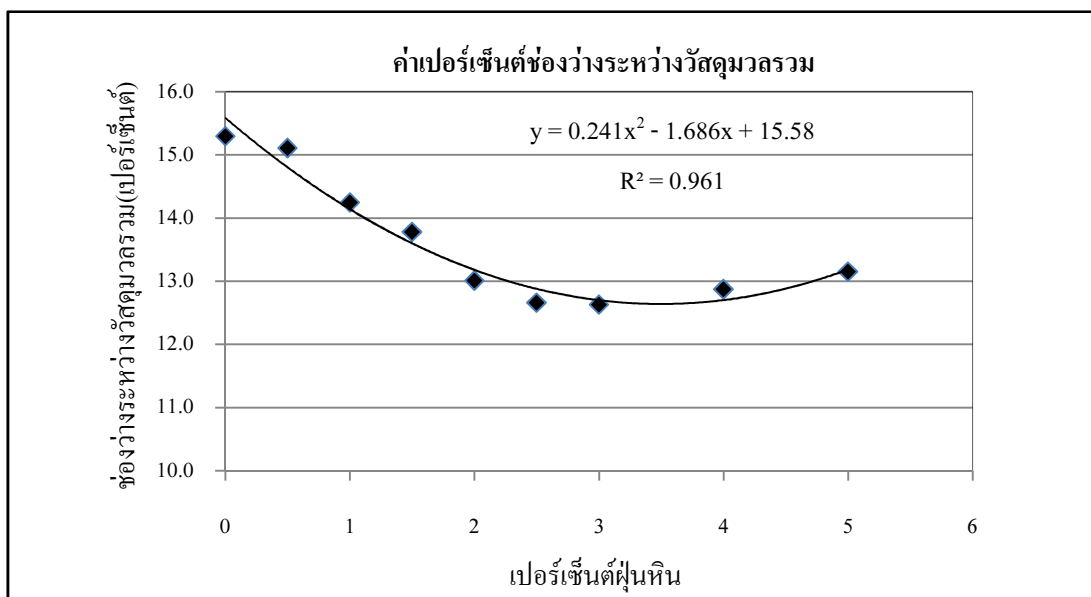
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน



รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์รูพรุน



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์รูพรุน



รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับเปอร์เซ็นต์ฝุ่นหิน

ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินพบว่าเมื่อเพิ่มฝุ่นหินในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นและเริ่มลดลงในช่วง 3.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะฝุ่นหินจะอุดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์มากเกินไปทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถช่วยในการยึดเกาะวัสดุมวลรวมได้ทำให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความร่วน ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศจะลดลงในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะฝุ่นหินเข้าไปอุดแทรกช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีตและเริ่มมีช่องว่างอากาศเพิ่มขึ้นในช่วง 3.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะแอสฟัลต์คอนกรีตไม่สามารถยึดเกาะกันได้ ส่วนค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 3.0 เปอร์เซ็นต์ และจะเริ่มลดลงเพราะปริมาณฝุ่นหินมากเกินไปทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์ไม่สามารถช่วยในการยึดเกาะวัสดุมวลรวมได้ ส่วนค่าการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ และจะเริ่มลดลงเพราะฝุ่นหินมีปริมาณที่มากเกินไป ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ เพราะฝุ่นหินที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์มีขนาดเล็กทำให้เข้าไปแทนที่ช่องว่างอากาศ และเริ่มลดลงในช่วง 3.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะฝุ่นหินที่ถูกเคลือบด้วยแอสฟัลต์มากเกินไปทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์มีปริมาณน้อยจึงไม่สามารถยึดเกาะวัสดุมวลรวมได้ดีเท่าที่ควร และค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมจะมีค่าลดลงในช่วง 0.5 ถึง 2.5 เปอร์เซ็นต์ และเริ่มเพิ่มขึ้นในช่วง 3.0 ถึง 5.0 เปอร์เซ็นต์ เพราะฝุ่นหินมีมากเกินไป

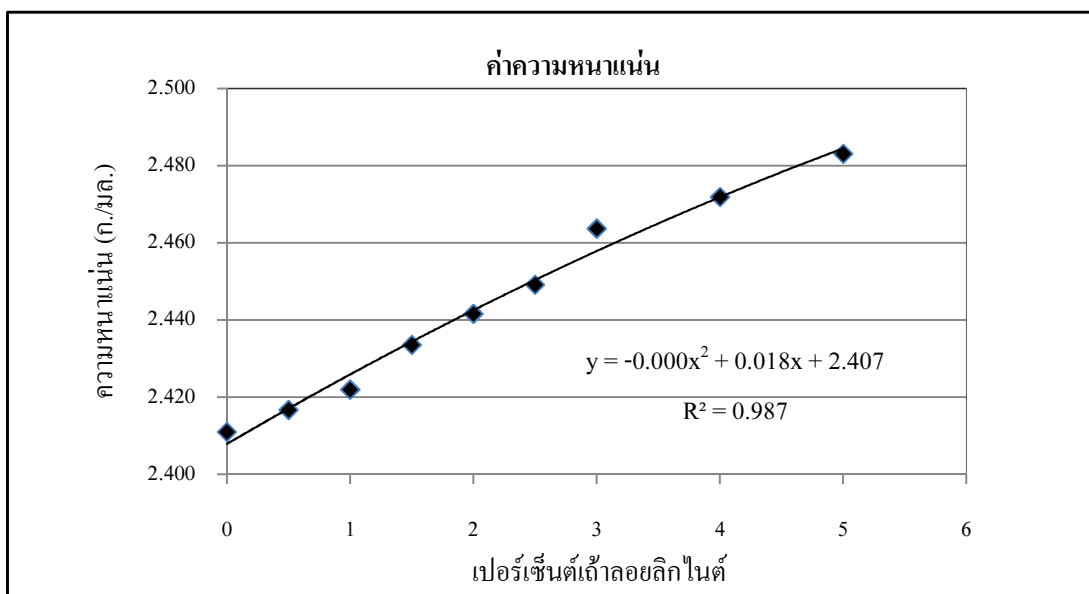
การทดสอบเลือกปริมาณส่วนผสมเพิ่มฝุ่นหินที่เหมาะสมนั้น จะดูความสามารถของค่าเสถียรภาพที่ดีขึ้นเพราะจะช่วยการรับน้ำหนักและลดการเกิดร่องล้อได้ดี แต่ค่าต่าง ๆ ต้องอยู่ในมาตรฐานด้วย พบว่าการใช้ฝุ่นหินผสมเพิ่มที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเหมาะสม โดยค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทดสอบเท่ากับ 2,438 ปอนด์ (ไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศลดน้อยลงมีผลทดสอบเท่ากับ 2.4 เปอร์เซ็นต์ อยู่ต่ำกว่าข้อกำหนด 0.6 เปอร์เซ็นต์ (อยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าการไหลเพิ่มขึ้นได้ผลทดสอบเท่ากับ 11.2 1/100 นิ้ว อยู่ในข้อกำหนด (อยู่ระหว่าง 8 - 16 1/100 นิ้ว) แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมลดลงได้ผลทดสอบเท่ากับ 12.9 เปอร์เซ็นต์ (ไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งมีค่าน้อยกว่ามาตรฐานอยู่ 1.1 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินในอัตราส่วน 2.5 เปอร์เซ็นต์

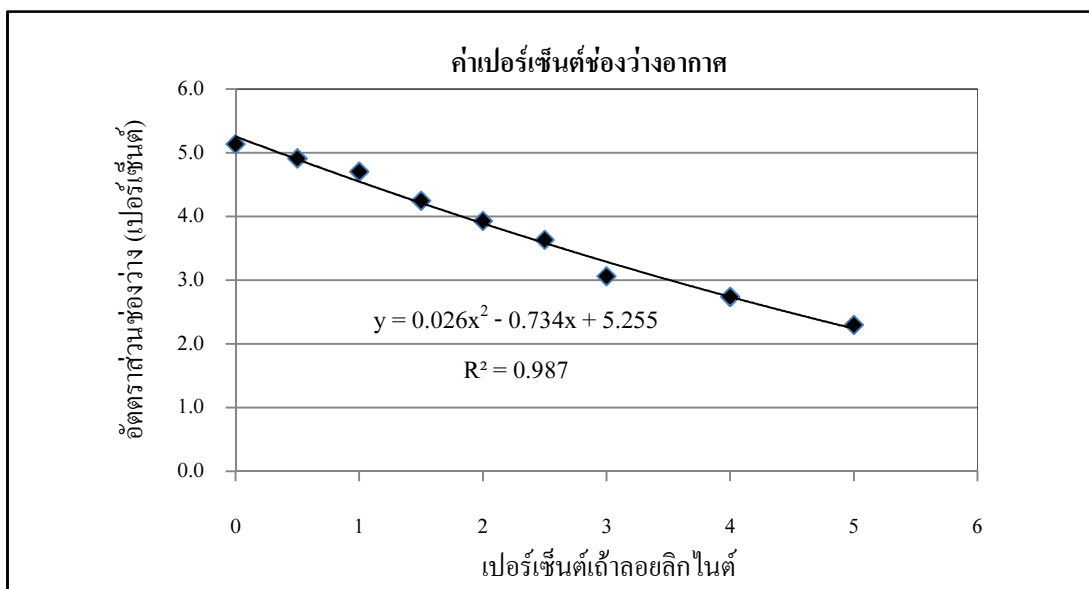
| การทดสอบ | หน่วย | ผลทดสอบ | มาตรฐาน |
|---|------------------|---------|-------------------|
| ค่าความหนาแน่น | กรัมต่อมิลลิเมตร | 2.479 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ | เปอร์เซ็นต์ | 2.4 | 3 - 5 |
| ค่าเสถียรภาพ | ปอนด์ | 2,438 | ไม่น้อยกว่า 1,800 |
| ค่าการไหล | 1/100 นิ้ว | 11.2 | 8 - 16 |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ | เปอร์เซ็นต์ | 81.1 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม | เปอร์เซ็นต์ | 12.9 | ไม่น้อยกว่า 14 |

4.4.3 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอยลิกไนต์

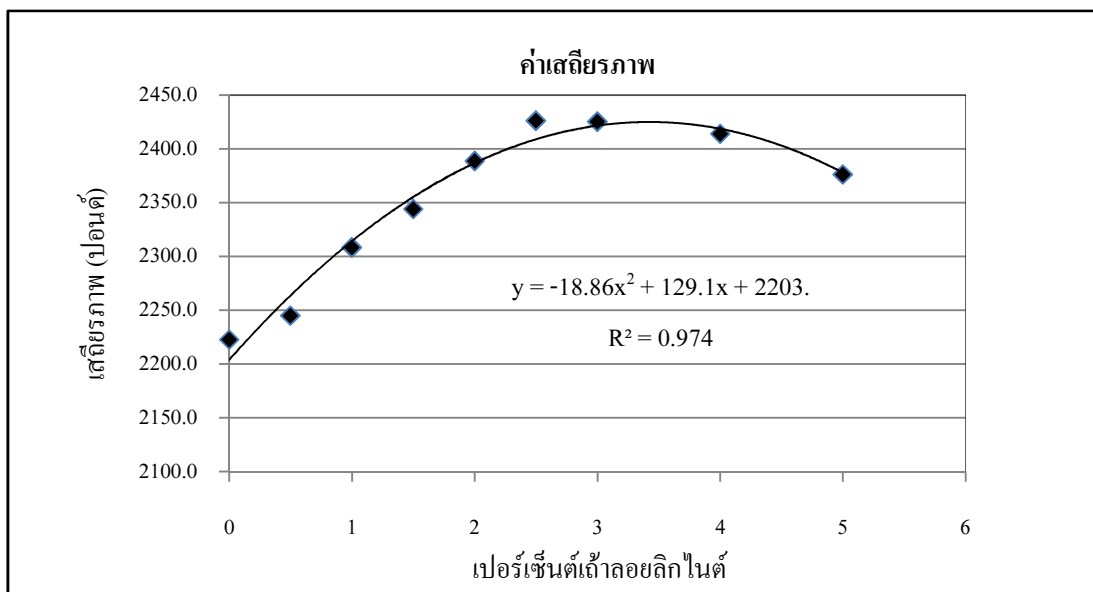
ผลทดสอบการผสมเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์ได้ผลทดสอบดังแสดงในรูปที่ 4.23 ถึง 4.28



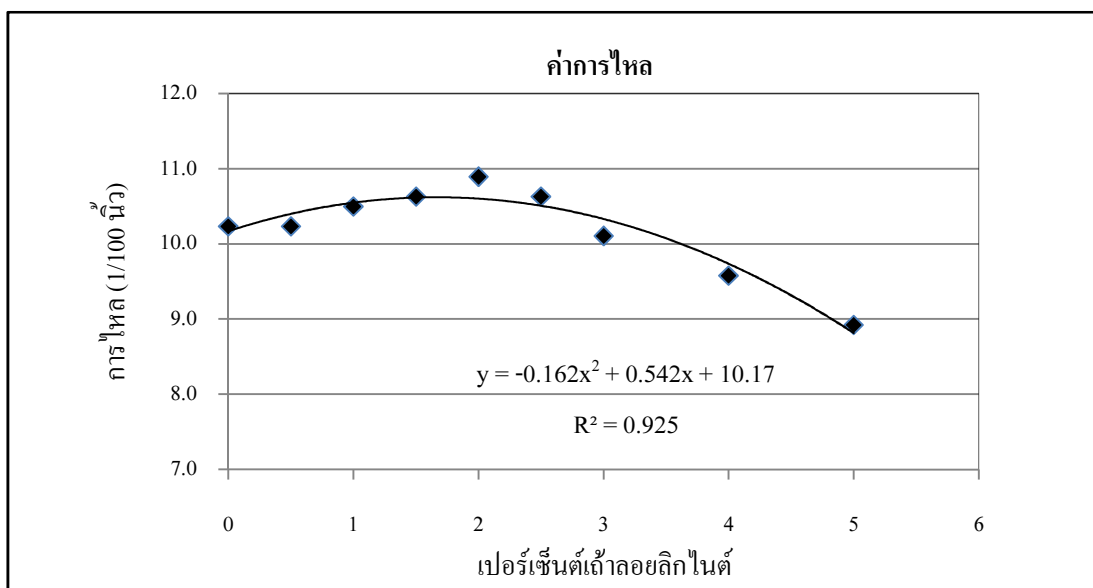
รูปที่ 4.23 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาแน่นกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์



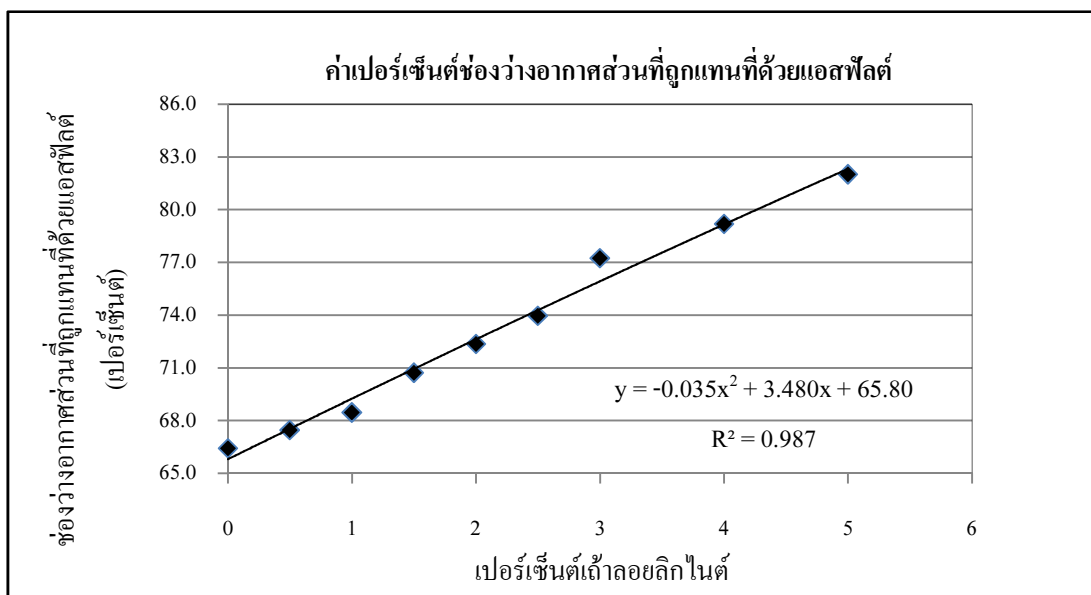
รูปที่ 4.24 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์



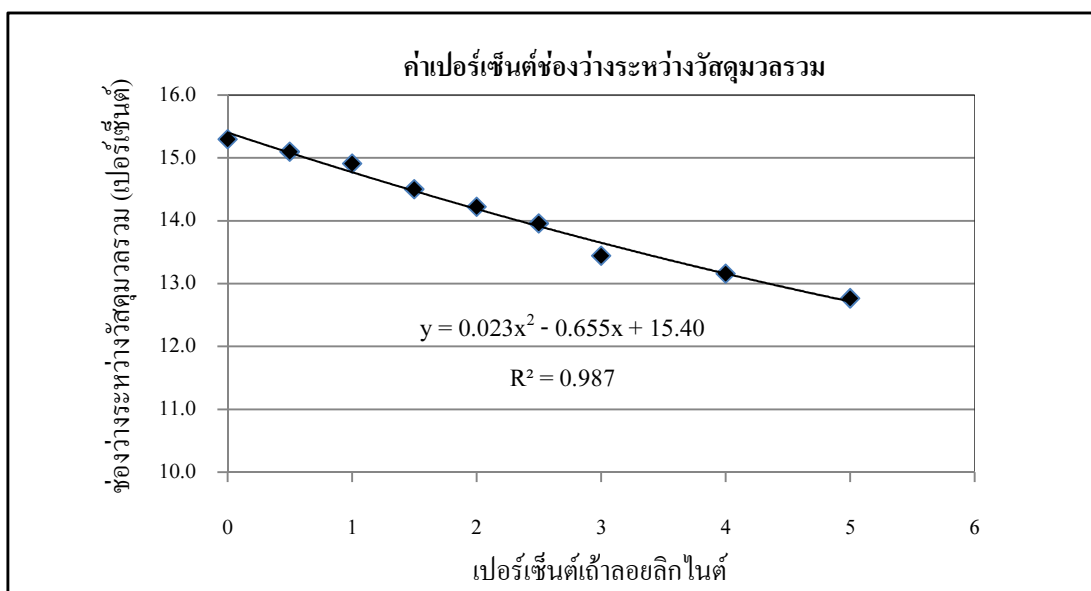
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเสถียรภาพกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์



รูปที่ 4.26 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการไหลกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์



รูปที่ 4.27 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์กับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์



รูปที่ 4.28 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมกับเปอร์เซ็นต์เถ้าลอยลิกไนต์

ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วยเถ้าลอยลิกไนต์พบว่า เมื่อเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์อย่างต่อเนื่องเพราะเถ้าลอยลิกไนต์มีลักษณะกลมทำให้ดูดซึมแอสฟัลต์ซีเมนต์ได้น้อยกว่าซีเมนต์และฝุ่นหินมาก ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศจะลดลงอย่างต่อเนื่อง เพราะเถ้าลอยลิกไนต์เข้าไปอุดแทรกช่องว่างอากาศของแอสฟัลต์คอนกรีตได้ดี ส่วนค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 3.0 เปอร์เซ็นต์ และจะเริ่มลดลงเพราะปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์มากเกินไปทำให้เคลื่อนตัวได้ง่าย และแอสฟัลต์ซีเมนต์มีปริมาณน้อยจึงไม่สามารถช่วยในการยึดเกาะวัสดุรวมได้ ส่วนค่าการไหลมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วง 0.5 ถึง 2.0 เปอร์เซ็นต์ และจะเริ่มลดลงเพราะเถ้าลอยลิกไนต์มีปริมาณมากเกินไปทำให้แอสฟัลต์ซีเมนต์เคลือบวัสดุรวมได้ไม่ดีพอ ส่วนค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์จะมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยสอดคล้องกับค่าความหนาแน่น และค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุรวมจะมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องโดยสอดคล้องกับค่าอัตราส่วนช่องว่าง

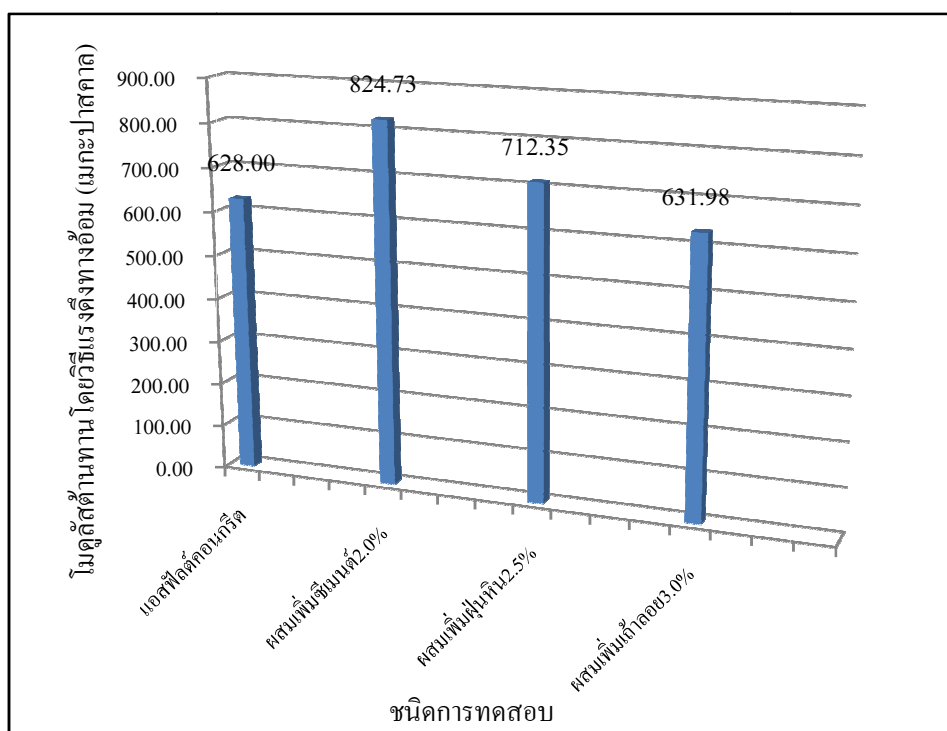
การทดสอบเลือกปริมาณส่วนผสมเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมนั้น จะดูความสามารถของค่าเสถียรภาพที่ดีขึ้นเพราะจะช่วยการรับน้ำหนักและลดการเกิดร่องล้อได้ดี แต่ค่าต่าง ๆ ต้องอยู่ในมาตรฐานด้วย พบว่าการใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมเพิ่มที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ จะมีความเหมาะสม โดยค่าเสถียรภาพมีค่าเพิ่มขึ้นมีผลทดสอบเท่ากับ 2,421 ปอนด์ (ไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศมีผลทดสอบเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ (อยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าการไหลเพิ่มขึ้นผลทดสอบเท่ากับ 10.3 1/100 นิ้ว อยู่ในข้อกำหนด (อยู่ระหว่าง 8 - 16 1/100 นิ้ว) แต่ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุรวมลดลงได้ผลทดสอบเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์ (ไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) น้อยกว่ามาตรฐาน 0.3 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์ในอัตราส่วน 3.0 เปอร์เซ็นต์

| การทดสอบ | หน่วย | ผลทดสอบ | มาตรฐาน |
|---|----------------|---------|-------------------|
| ค่าความหนาแน่น | กรัมต่อมิลลิตร | 2.458 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ | เปอร์เซ็นต์ | 3.3 | 3 - 5 |
| ค่าเสถียรภาพ | ปอนด์ | 2,421 | ไม่น้อยกว่า 1,800 |
| ค่าการไหล | 1/100 นิ้ว | 10.3 | 8 - 16 |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ | เปอร์เซ็นต์ | 75.9 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุรวม | เปอร์เซ็นต์ | 13.7 | ไม่น้อยกว่า 14 |

4.5 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

เมื่อได้ผลการทดสอบและปริมาณของวัสดุผสมเพิ่มที่เหมาะสมด้วยวิธีมาร์แชลล์แล้ว จะทำการทดสอบเพิ่มด้วยวิธีหาค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดสอบดังรูปที่ 4.29 จะเห็นได้ว่าการเลือก ใช้ซีเมนต์ที่ 2.0 เปอร์เซ็นต์จะมีความสามารถในการต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมได้ดีกว่า ฟูนิน 2.5 เปอร์เซ็นต์ และถั่วลอยลิกไนต์ 3.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ



รูปที่ 4.29 ผลทดสอบ โมดูลัสต้านทาน โดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

จากการทดสอบการผสมเพิ่มของวัสดุทั้ง ซีเมนต์ ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 เปรียบเทียบผลทดสอบการผสมเพิ่มของซีเมนต์ ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์

| การทดสอบ | หน่วย | วัสดุ | | | มาตรฐาน |
|---|------------------|---------|---------|---------|-------------------|
| | | ซีเมนต์ | ฝุ่นหิน | เถ้าลอย | |
| ค่าความหนาแน่น | กรัมต่อมิลลิเมตร | 2.462 | 2.479 | 2.458 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ | เปอร์เซ็นต์ | 3.2 | 2.4 | 3.3 | 3-5 |
| ค่าเสถียรภาพ | ปอนด์ | 2,514 | 2,438 | 2,421 | ไม่น้อยกว่า 1,800 |
| ค่าการไหล | 1/100 นิ้ว | 11.3 | 11.2 | 10.3 | 8-16 |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ | เปอร์เซ็นต์ | 76.9 | 81.1 | 75.9 | - |
| ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุ มวลรวม | เปอร์เซ็นต์ | 13.5 | 12.9 | 13.7 | ไม่น้อยกว่า 14 |
| โมดูลัสด้านทานโดยวิธีแรงดึง ทางอ้อม | เมกะปาสคาล | 824.73 | 712.35 | 631.98 | - |

4.6 ผลการวิเคราะห์ค่าใช้จ่ายของแอสฟัลต์คอนกรีตกับวัสดุผสมเพิ่มประเภทต่าง ๆ

จากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าใช้จ่ายโดยประมาณในการเลือกผสมเพิ่มของวัสดุทั้ง 3 ชนิดกับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาโดยแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดามีค่าใช้จ่ายต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 1,858.83 บาท แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มซีเมนต์จะมีราคาที่สูงที่สุด ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 1,974.90 บาท แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มฝุ่นหิน ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 1,858.83 บาท แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์ ต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร เท่ากับ 1,867.17 บาท จะสังเกตได้ว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มฝุ่นหินจะมีราคาเท่ากับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาเพราะกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตจะต้องกำจัดฝุ่นหินที่ไม่จำเป็นทิ้งไปจึงมีอยู่มากในโรงผสม แสดงดังตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 เปรียบเทียบราคาต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร (บาท)

| ชนิดการออกแบบ | มวลรวม | แอสฟัลต์ | วัสดุผสม | รวมราคา |
|--|--------|----------|----------|----------|
| แอสฟัลต์คอนกรีต | 350.00 | 1,508.83 | 0.00 | 1,858.83 |
| แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่ม ซีเมนต์ | 350.00 | 1,508.83 | 116.07 | 1,974.90 |
| แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่ม ฝุ่นหิน | 350.00 | 1,508.83 | 0.00 | 1,858.83 |
| แอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่ม ถ้ำลอยลิกไนต์ | 350.00 | 1,508.83 | 8.34 | 1,867.17 |

หมายเหตุ : ไม่รวมค่าแรง ขนส่ง และเครื่องจักร

บทที่ 5

บทสรุป

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาคุณสมบัติวัสดุมวลรวม แอสฟัลต์คอนกรีตและประสิทธิภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ ฟูนินและเถ้าลอยลิกไนต์ เป็นไปตามขั้นตอนและมาตรฐานการทดสอบกรมทางหลวงโดยสามารถสรุปผลการวิจัยดังต่อไปนี้

5.1.1 ผลทดสอบมวลรวม

วัสดุมวลรวมหยาบ ทดสอบหาค่าความสึกหรอ (Los Angeles Abrasion) ได้ผลทดสอบเท่ากับ 31.23 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่เกิน 40 เปอร์เซ็นต์) ทดสอบค่าความทนทาน (Soundness) ได้ผลทดสอบเท่ากับ 0.95 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์) ทดสอบค่าดัชนีความแบน (Flakiness Index) ได้ผลทดสอบเท่ากับ 28 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์) ทดสอบดัชนีความยาว (Elongation Index) ได้ผลทดสอบเท่ากับ 18 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่เกิน 30 เปอร์เซ็นต์)

วัสดุมวลรวมละเอียด ทดสอบความทนทาน (Soundness) ได้ผลทดสอบเท่ากับ 4.10 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่เกิน 9 เปอร์เซ็นต์) ทดสอบหาค่าทรายสมมูล (Sand Equivalent) ได้ผลทดสอบเท่ากับ 71 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 30 เปอร์เซ็นต์)

5.1.2 ผลทดสอบเลือกปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมของแอสฟัลต์คอนกรีต

การทดสอบเลือกปริมาณแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมได้ผลการทดสอบเท่ากับ 4.8 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักวัสดุมวลรวม โดยพิจารณาจากความสัมพันธ์ในรูปกราฟพบว่า ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.418 กรัมต่อมิลลิเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศเท่ากับ 4.8 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,224 ปอนด์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าการไหลเท่ากับ 10 (1/100 นิ้ว) (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 8 - 16 (1/100 นิ้ว)) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เท่ากับ 68.1 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม 15 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวง

ไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 628.00 เมกะปาสกาล

5.1.3 ผลทดสอบเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสม

การทดสอบเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุผสมแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยดูความสัมพันธ์ในรูปกราฟพบว่าปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนผสมที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.462 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 1.8 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศเท่ากับ 3.2 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 50.0 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,514 ปอนด์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 13.0 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าการไหลเท่ากับ 11.3 (1/100 นิ้ว) มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 13.2 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 8 - 16 (1/100 นิ้ว)) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เท่ากับ 76.9 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 12.9 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมเท่ากับ 13.5 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงจากแอสฟัลต์คอนกรีต 11.1 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 824.73 เมกะปาสกาล มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 31.3 เปอร์เซ็นต์

5.1.4 ผลทดสอบเลือกปริมาณฝุ่นหินที่เหมาะสม

การทดสอบเลือกปริมาณฝุ่นหินที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุผสมแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยดูความสัมพันธ์ในรูปกราฟพบว่าปริมาณฝุ่นหินที่เหมาะสมเท่ากับ 2.5 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนผสมที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.479 กรัมต่อมิลลิลิตร มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 2.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศเท่ากับ 2.4 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 100.0 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,438 ปอนด์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 9.6 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าการไหลเท่ากับ 11.2 (1/100 นิ้ว) มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 12.0 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 8 - 16 (1/100 นิ้ว)) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เท่ากับ 81.1 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 19.1 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมเท่ากับ 12.9 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 16.3 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรม

ทางหลวงไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 712.35 เมกะปาสกาล มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 13.4 เปอร์เซ็นต์

5.1.5 ผลทดสอบเลือกปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสม

การทดสอบเลือกปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมสำหรับเป็นวัสดุผสมแทรกในแอสฟัลต์คอนกรีต โดยดูความสัมพันธ์ในรูปกราฟพบว่าปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมเท่ากับ 3.0 เปอร์เซ็นต์ โดยส่วนผสมที่ได้จะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 2.458 กรัมต่อมิลลิกรัม มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 1.7 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศเท่ากับ 3.3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 45.5 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 3 - 5 เปอร์เซ็นต์) ค่าเสถียรภาพเท่ากับ 2,421 ปอนด์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 8.9 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 1,800 ปอนด์) ค่าการไหลเท่ากับ 10.3 (1/100 นิ้ว) มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 3.0 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงอยู่ระหว่าง 8 - 16 (1/100 นิ้ว)) ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์เท่ากับ 75.9 เปอร์เซ็นต์ มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 11.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมเท่ากับ 13.7 เปอร์เซ็นต์ มีค่าลดลงจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 9.4 เปอร์เซ็นต์ (มาตรฐานกรมทางหลวงไม่น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์) ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 631.98 เมกะปาสกาล มีค่าเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 0.6 เปอร์เซ็นต์

5.1.6 สรุปผลทดสอบวัสดุผสมเพิ่ม

ในการทดสอบเลือกอัตราส่วนแอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยวัสดุผสมเพิ่มที่เหมาะสมนั้นกรมทางหลวงนิยมใช้ค่าการวิเคราะห์จากกราฟที่ได้จากค่าความหนาแน่น ค่าการไหล และค่าเสถียรภาพเป็นหลัก โดยดูค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์ และค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวมใช้ในประกอบการตัดสินใจได้ผลสรุปการทดสอบดังนี้

1) ผลทดสอบเลือกปริมาณซีเมนต์ที่เหมาะสมต่อแอสฟัลต์คอนกรีตที่ 2.0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าซีเมนต์มีรูปร่างลักษณะเหลี่ยมมีขนาดเล็กช่วยเข้าไปอุดช่องว่างต่าง ๆ ในแอสฟัลต์คอนกรีตทำให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยให้ค่าการไหลดีขึ้น และมีค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้นจากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาโดยคิดเป็น 1.8 13.2 และ 13.0 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมดีขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 31.3 เปอร์เซ็นต์

2) ผลทดสอบเลือกปริมาณฝุ่นหินที่เหมาะสมต่อแอสฟัลต์คอนกรีตที่ 2.5 เปอร์เซ็นต์ พบว่าฝุ่นหินมีรูปร่างลักษณะเหลี่ยมหลายเหลี่ยมคล้ายชั้นหินมีขนาดเล็กละเอียดกว่า

ซีเมนต์และเถ้าลอยลิกไนต์ ทำให้ฝุ่นหินช่วยเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ในแอสฟัลต์คอนกรีตทำให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยให้ค่าการไหลดีขึ้น และค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้น จากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาโดยคิดเป็น 2.5 12.0 และ 9.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมดีขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 13.4 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แอสฟัลต์แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยฝุ่นหินถือว่ามีความเหมาะสมที่จะนำข้อมูลไปศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

3) ผลทดสอบเลือกปริมาณเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมต่อแอสฟัลต์คอนกรีตที่ 3.0 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเถ้าลอยลิกไนต์มีรูปร่างลักษณะกลมและมีขนาดเล็ก ทำให้เถ้าลอยลิกไนต์ช่วยเข้าไปอุดช่องว่างเล็ก ๆ ในแอสฟัลต์คอนกรีตทำให้มีค่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ช่วยให้ค่าการไหลดีขึ้น และค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้น จากแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดาโดยคิดเป็น 1.7 3.0 และ 8.9 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมดีขึ้นกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา 0.6 เปอร์เซ็นต์ ทำให้แอสฟัลต์แอสฟัลต์คอนกรีตที่ปรับปรุงคุณภาพด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ถือว่ามีความเหมาะสมที่จะนำข้อมูลไปศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง

4) สำหรับค่าใช้จ่ายในการผลิตโดยเปรียบเทียบราคาต่อ 1 ลูกบาศก์เมตรพบว่า ส่วนผสมเพิ่มซีเมนต์ 2 เปอร์เซ็นต์มีราคาอยู่ที่ 1,974.90 บาท ส่วนผสมเพิ่มฝุ่นหิน 2.5 เปอร์เซ็นต์มีราคาอยู่ที่ 1,858.83 บาท (ราคาเท่ากับแอสฟัลต์คอนกรีตธรรมดา) และส่วนผสมเพิ่มเถ้าลอยลิกไนต์ 3.0 เปอร์เซ็นต์มีราคาอยู่ที่ 1,867.17 บาท ทำให้พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มฝุ่นหินมีราคาถูกที่สุดถัดมาเป็นเถ้าลอยลิกไนต์และซีเมนต์

ดังนั้นการนำฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์มาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างเหมาะสม อย่างไรก็ตามการพิจารณาจะต้องทดลองใช้จริงในสนามเพื่อตรวจสอบความคงทนการต้านทานการเกิดร่องล้อ รวมไปถึงค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาผิวถนนประเภทต่าง ๆ ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้งานจริง

5.2 ข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้ได้เลือกใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมเพียงเปอร์เซ็นต์เดียวดังนั้นควรมีการศึกษาเพื่อเติมโดยการลดและเพิ่มจากแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมเพื่อนำผลทดสอบมาเปรียบเทียบเพิ่มเติม สำหรับการทดสอบด้วยวิธีหาค่าโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Indirect Tensile Stiffness Modulus) ผู้วิจัยได้เลือกทดสอบอุณหภูมิเดียวเพราะด้วยระยะเวลางบประมาณ และเครื่องมือทดสอบที่จำกัด ดังนั้นควรมีการทดสอบเพิ่มเติมในหลายอุณหภูมิเพื่อศึกษาคุณสมบัติของแอสฟัลต์คอนกรีตและแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเพิ่มด้วย ซีเมนต์ ฝุ่นหิน และ

เถ้าลอยลิกไนต์จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างไรต่ออุณหภูมิต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับประเทศไทย แต่อย่างไรก็ตามควรมีการศึกษาค่าต่าง ๆ เพิ่มเติมดังต่อไปนี้

- ควรมีการศึกษาประสิทธิภาพของการนำ ซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ ในการทดแทนหินฝุ่นในอัตราส่วนต่าง ๆ ของปริมาณแอสฟัลต์คอนกรีตที่แตกต่างกัน
- ควรมีการศึกษารูปแบบการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมแทรกด้วย ซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ เพิ่มเติม
- ควรมีการศึกษาค่าการเกิดความสึกร่อนล้อ (Rutting) และค่าความล้า (Fatigue) เพิ่มเติม
- ควรมีการทดสอบจริงในสนามเพื่อนำผลที่ได้มาตรวจสอบความถูกต้องตามที่ออกแบบในห้องปฏิบัติการ

รายการอ้างอิง

กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม. 2530. **วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 1.**

กรมทางหลวง. 2539. สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. **มาตรฐานงานทาง.** โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพมหานคร.

กรมทางหลวง. สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. 2543. **มาตรฐานวิธีการทดลอง.** โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์, กรุงเทพมหานคร

กรมทางหลวงสำนักทางหลวงที่ 8. ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม. 2547. **คู่มือวิธีการปฏิบัติงานออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์,** นครราชสีมา. 63น.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2539. การศึกษาศักยภาพการนำถ่านล้อยมาใช้ประโยชน์. กองการพิมพ์ ฝ่ายประชาสัมพันธ์ กฟผ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.

ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์. 2543. **การออกแบบผิวจราจร.** สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 273น.

ชัย จารุพิทักษ์กุล, สุรเชษฐ์ จิงเกษมโชคชัย และวราภรณ์ คุณาวนากิจ. 2543. คุณสมบัติพื้นฐานทางเคมีและทางกายภาพของถ่านล้อย. เอกสารทางวิชาการ การสัมมนาเรื่องการใช้ถ่านล้อยในงานคอนกรีต ครั้งที่ 5 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยและสมาคมวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์. หน้า 7-19.

ชัยชาญ วรนิทัศน์. 2530. **ชี้ถ่านล้อยสำหรับเป็นวัสดุอัดแทรกในคอนกรีตแอสฟัลต์.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 153น.

นิรชร พึ่งแดง. 2550. **การทดสอบวัสดุการทาง.** โรงพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย - ญี่ปุ่น), กรุงเทพมหานคร. 564น.

บัญชา เอกกัณหา. 2539. **การเปรียบเทียบเสถียรภาพของคอนกรีตแอสฟัลต์ผสมปูนขาวกับคอนกรีตแอสฟัลต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์.** วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 73น.

สมพงษ์ ชีไธสง. 2542 .การศึกษาการปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสม
 เพิ่มในแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด Pen. 60/70 และใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียด
 ในแอสฟัลต์คอนกรีต. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา ภาควิชา
 วิศวกรรมศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพมหานคร.

Abo-Qudais SA. (2007). **The effects of environmental damage evaluation techniques on the prediction of environmental damage in asphalt mixtures.** Building and Environment Journal, UK [submitted].

Brown ER, Bassett CE. (1990). **Effect of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt aggregate mixtures.** Building and Environment Journal.

Burak Sengoz, Ali Topal. (2006). **Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt film thickness.** Building and Environment Journal.

M. Shahul Hameed and A. S. S. Sekar (2008). **Properties of Green Concrete Containing Quarry Rock Dust and Mable Sludge Powder as fine Aggregate.** Building and Environment Journal.

Ratnasamy Muniandy, Eltaher Elzarroug Aburkaba, Hussain Bin Hamid and Robiah BT Yunus (2009). **An Initia Investigation of the usd of Local Industrial Wastes and By-Products as Mineral Fillers in Stone Mastic Asphalt Pavements.** Building and Environment Journal.

Shaopeng Wu, Yongjie Xue, Qunshan Ye and Yongchun Chen. (2006). **Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures.** Building and Environment Journal 42, pp. 2580-2585

ภาคผนวก ก

ผลทดสอบ

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโ

สถานที่ทดสอบ ส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรมทางหลวงที่ 8 และห้องทดสอบวัสดุการ

ทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะมะวลรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม (Gag) = 2.717

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูดซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4 | | | 4.5 | | | 5 | | |
| %AC by Mass of Mix (b) | 3.85 | | | 4.31 | | | 4.76 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b-x(100-b)/100$ | 3.61 | | | 4.07 | | | 4.53 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1236.9 | 1236.6 | 1233.1 | 1240.3 | 1238.1 | 1240.1 | 1237.7 | 1242.8 | 1238.7 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1250.7 | 1254.4 | 1246.7 | 1248.2 | 1239.3 | 1243.5 | 1240.2 | 1243.6 | 1242.0 |
| Mass in Water g(g) | 721.8 | 725.1 | 719.4 | 730.9 | 723.5 | 726.2 | 729.0 | 732.7 | 732.3 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 528.9 | 529.3 | 527.3 | 517.3 | 515.7 | 517.3 | 511.2 | 510.9 | 509.7 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.339 | 2.336 | 2.339 | 2.398 | 2.401 | 2.397 | 2.421 | 2.433 | 2.430 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.338 | | | 2.399 | | | 2.428 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 8.2 | | | 9.5 | | | 10.7 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 82.8 | | | 84.5 | | | 85.1 | | |
| VMA % (l):100-k | 17.2 | | | 15.5 | | | 14.9 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 9.1 | | | 6.0 | | | 4.2 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 47.5 | | | 61.1 | | | 71.8 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2428 | 2514 | 2456 | 2514 | 2342 | 2536 | 2496 | 2308 | 2376 |
| Adjust lbs | 2161 | 2162 | 2186 | 2237 | 2249 | 2257 | 2222 | 2216 | 2210 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2170 | | | 2248 | | | 2216 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 9 | | | 10 | | | 11 | | |

ตารางผนวกที่ 2 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโก

สถานที่ทดสอบ ส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรมทางหลวงที่ 8 และห้องทดสอบวัสดุการ

ทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะมวลรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูดซึ่มยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 5.5 | | | 6 | | | | | |
| %AC by Mass of Mix (b) | 5.21 | | | 5.66 | | | | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b-x(100-b)/100$ | 4.98 | | | 5.43 | | | | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1237.3 | 1237.0 | 1237.5 | 1242.1 | 1243.9 | 1238.6 | | | |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1238.8 | 1246.9 | 1239.5 | 1243.0 | 1244.8 | 1239.5 | | | |
| Mass in Water g(g) | 729.7 | 737.4 | 730.7 | 728.7 | 729.0 | 725.8 | | | |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 509.1 | 509.5 | 508.8 | 514.3 | 515.8 | 513.7 | | | |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.430 | 2.428 | 2.432 | 2.415 | 2.412 | 2.411 | | | |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.430 | | | 2.413 | | | | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 11.8 | | | 12.7 | | | | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 84.8 | | | 83.8 | | | | | |
| VMA % (l):100-k | 15.2 | | | 16.2 | | | | | |
| Air Voids % (m):l-j | 3.5 | | | 3.5 | | | | | |
| VFB % (n):100*j/l | 77.3 | | | 78.4 | | | | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2211 | 2394 | 2222 | 2165 | 2068 | 1988 | | | |
| Adjust lbs | 2056 | 2059 | 2067 | 1927 | 1923 | 1909 | | | |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2060 | | | 1920 | | | | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | | | |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 11 | | | 11 | | | | | |

ตารางผนวกที่ 3 ผลการทดสอบค่าดัชนีความแข็งแรง Strength Index

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโก้

สถานที่ทดสอบ ส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรมทางหลวงที่ 8 และห้องทดสอบวัสดุการ

ทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะมวลรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|--------|--------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | | | 4.8 | | | |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | | 4.58 | | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | | 4.34 | | | |
| Spec. Hgt. in(d) | Soaked | | | | Unsoked | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1247.7 | 1252.8 | 1248.5 | 1250.2 | 1250.7 | 1249.1 | 1250.5 | 1248.9 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1253.7 | 1254.6 | 1253.9 | 1254.1 | 1254.9 | 1254.0 | 1255.1 | 1253.7 |
| Mass in Water g(g) | 730.2 | 730.5 | 731.0 | 729.3 | 731.2 | 730.3 | 730.4 | 730.6 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 523.5 | 524.1 | 522.9 | 524.8 | 523.7 | 523.7 | 524.7 | 523.1 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.383 | 2.390 | 2.388 | 2.382 | 2.388 | 2.385 | 2.383 | 2.387 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.386 | | | | 2.386 | | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.1 | | | | 10.1 | | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 83.8 | | | | 83.8 | | | |
| VMA % (l):100-k | 16.2 | | | | 16.2 | | | |
| Air Voids % (m):l-j | 6.1 | | | | 6.1 | | | |
| VFB % (n):100*j/l | 62.2 | | | | 62.2 | | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 6055 | 5964 | 5735 | 5735 | 7449 | 7420 | 7192 | 6992 |
| Adjust lbs | 5389 | 5546 | 5334 | 5506 | 6629 | 6604 | 6688 | 6712 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 5444 | | | | 6658 | | | |
| การไหล | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 19 | 20 | 20 | 19 | 15 | 16 | 16 | 16 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 20 | | | | 16 | | | |

$$\text{Strength Index} = \frac{5444}{6658} \times 100 = 81.8\%$$

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยซีเมนต์

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, ซีเมนต์

สถานที่ทดสอบ และห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละมวบรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม (Gag) = 2.717

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 0.5 | 4.8 | | 1.0 | 4.8 | | 1.5 |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | 4.58 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | 4.34 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1245.9 | 1245.1 | 1248.3 | 1257.5 | 1261.8 | 1259.1 | 1262.5 | 1262.7 | 1264.6 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1247.3 | 1246.3 | 1250.3 | 1258.2 | 1262.8 | 1257.1 | 1263.5 | 1263.7 | 1265.4 |
| Mass in Water g(g) | 731.9 | 731.4 | 733.0 | 740.3 | 743.2 | 738.8 | 748.8 | 749.5 | 749.0 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 515.5 | 515.0 | 517.3 | 517.9 | 519.6 | 518.3 | 514.7 | 514.2 | 516.4 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.417 | 2.418 | 2.413 | 2.428 | 2.429 | 2.429 | 2.453 | 2.456 | 2.449 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.416 | | | 2.429 | | | 2.452 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.2 | | | 10.2 | | | 10.3 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 84.9 | | | 85.3 | | | 86.2 | | |
| VMA % (l):100-k | 15.1 | | | 14.7 | | | 13.8 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 4.9 | | | 4.4 | | | 3.5 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 67.3 | | | 69.7 | | | 74.7 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2474 | 2479 | 2456 | 2622 | 2662 | 2622 | 2548 | 2582 | 2582 |
| Adjust lbs | 2300 | 2306 | 2284 | 2439 | 2369 | 2439 | 2446 | 2479 | 2479 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2297 | | | 2415 | | | 2468 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 10 | 11 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 10.3 | | | 10.6 | | | 11.0 | | |

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมทรายซีเมนต์ (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, ซีเมนต์

สถานที่ทดสอบ ห้องทดสอบวัสดุทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละมวบรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 2.0 | 4.8 | | 2.5 | 4.8 | | 3.0 |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | 4.58 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | 4.34 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1268.0 | 1267.7 | 1266.4 | 1278.1 | 1273.9 | 1273.4 | 1283.2 | 1279.8 | 1282.1 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1268.8 | 1268.2 | 1267.2 | 1278.5 | 1274.8 | 1274.0 | 1283.9 | 1283.7 | 1284.0 |
| Mass in Water g(g) | 755.4 | 754.3 | 753.4 | 764.2 | 757.6 | 758.4 | 769.9 | 765.0 | 763.9 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 513.4 | 513.9 | 513.8 | 514.3 | 517.3 | 515.6 | 514.0 | 518.7 | 520.1 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.470 | 2.467 | 2.465 | 2.485 | 2.463 | 2.470 | 2.497 | 2.467 | 2.465 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.467 | | | 2.473 | | | 2.476 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.4 | | | 10.4 | | | 10.4 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 86.7 | | | 86.9 | | | 87.0 | | |
| VMA % (l):100-k | 13.3 | | | 13.1 | | | 13.0 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 2.9 | | | 2.7 | | | 2.6 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 78.1 | | | 79.4 | | | 80.3 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2753 | 2645 | 2719 | 2679 | 2753 | 2748 | 2651 | 2822 | 2851 |
| Adjust lbs | 2561 | 2539 | 2529 | 2572 | 2561 | 2555 | 2545 | 2512 | 2537 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2543 | | | 2563 | | | 2531 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 11 | 11 | 11 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 11.3 | | | 11.6 | | | 11.4 | | |

ตารางผนวกที่ 4 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแตรกด้วยซีเมนต์ (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, ซีเมนต์

สถานที่ทดสอบ ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละวมวลรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 4.0 | 4.8 | | 5.0 | | | |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1294.7 | 1292.9 | 1295.0 | 1308.3 | 1308.2 | 1304.4 | | | |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1295.7 | 1294.3 | 1295.9 | 1308.9 | 1309.0 | 1305.2 | | | |
| Mass in Water g(g) | 773.3 | 773.7 | 777.4 | 782.6 | 787.6 | 777.0 | | | |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 522.4 | 520.6 | 518.5 | 526.2 | 521.4 | 528.2 | | | |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.478 | 2.484 | 2.498 | 2.486 | 2.509 | 2.470 | | | |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.487 | | | 2.488 | | | | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.5 | | | 10.5 | | | | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 87.4 | | | 87.4 | | | | | |
| VMA % (l):100-k | 12.6 | | | 12.6 | | | | | |
| Air Voids % (m):l-j | 2.2 | | | 2.1 | | | | | |
| VFB % (n):100*j/l | 82.9 | | | 83.3 | | | | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2771 | 2793 | 2811 | 2679 | 2674 | 2668 | | | |
| Adjust lbs | 2466 | 2486 | 2501 | 2492 | 2486 | 2374 | | | |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2484 | | | 2451 | | | | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 11 | 10 | 10 | 9 | 9 | 9 | | | |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 10.4 | | | 9.2 | | | | | |

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยฝุ่นหิน

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ฝุ่นหิน

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, โรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ต.

โคกกรวด

สถานที่ทดสอบ และห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละมวบรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม (Gag) = 2.717

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูดซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 0.5 | 4.8 | | 1 | 4.8 | | 1.5 |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | 4.58 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b-x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | 4.34 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1250.7 | 1251.4 | 1251.1 | 1262.1 | 1258.5 | 1257.8 | 1264.6 | 1265.0 | 1263.8 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1251.2 | 1254.0 | 1252.5 | 1262.8 | 1259.1 | 1258.8 | 1266.2 | 1265.8 | 1265.1 |
| Mass in Water g(g) | 734.4 | 734.2 | 735.9 | 746.8 | 742.7 | 743.2 | 750.9 | 749.4 | 751.0 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 516.8 | 519.8 | 516.6 | 516.0 | 516.4 | 515.6 | 515.2 | 516.4 | 514.1 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.420 | 2.407 | 2.422 | 2.446 | 2.437 | 2.440 | 2.454 | 2.450 | 2.458 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.416 | | | 2.441 | | | 2.454 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.2 | | | 10.3 | | | 10.3 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 84.9 | | | 85.8 | | | 86.2 | | |
| VMA % (l):100-k | 15.1 | | | 14.2 | | | 13.8 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 4.9 | | | 4.0 | | | 3.4 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 67.4 | | | 72.2 | | | 75.1 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2348 | 2514 | 2371 | 2302 | 2474 | 2582 | 2508 | 2485 | 2479 |
| Adjust lbs | 2184 | 2237 | 2276 | 2302 | 2300 | 2298 | 2332 | 2386 | 2380 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2232 | | | 2300 | | | 2366 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 10.3 | | | 11.6 | | | 11.8 | | |

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยฝุ่นหิน (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ฝุ่นหิน

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, โรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ต.

โคกกรวด

สถานที่ทดสอบ ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะมวดรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถฟ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถฟ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูดซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 2 | 4.8 | | 2.5 | 4.8 | | 3 |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | 4.58 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b-x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | 4.34 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1271.2 | 1270.7 | 1269.9 | 1279.0 | 1277.3 | 1277.4 | 1282.2 | 1283.4 | 1283.2 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1271.9 | 1271.4 | 1270.4 | 1279.4 | 1277.9 | 1277.6 | 1283.0 | 1284.7 | 1284.5 |
| Mass in Water g(g) | 760.0 | 756.8 | 757.5 | 765.3 | 764.0 | 763.6 | 767.3 | 767.8 | 769.4 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 511.9 | 514.6 | 512.9 | 514.1 | 513.9 | 514.0 | 515.7 | 516.9 | 515.1 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.483 | 2.469 | 2.476 | 2.488 | 2.485 | 2.485 | 2.486 | 2.483 | 2.491 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.476 | | | 2.486 | | | 2.487 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.4 | | | 10.5 | | | 10.5 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 87.0 | | | 87.3 | | | 87.4 | | |
| VMA % (l):100-k | 13.0 | | | 12.7 | | | 12.6 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 2.6 | | | 2.2 | | | 2.1 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 80.2 | | | 82.8 | | | 83.0 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2588 | 2605 | 2331 | 2616 | 2536 | 2428 | 2651 | 2753 | 2674 |
| Adjust lbs | 2407 | 2423 | 2424 | 2433 | 2435 | 2428 | 2465 | 2451 | 2486 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2418 | | | 2432 | | | 2467 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 11.3 | | | 11.4 | | | 11.3 | | |

ตารางผนวกที่ 5 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยฝุ่นหิน (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ฝุ่นหิน

แหล่งวัสดุ โรงม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, โรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ต.

โคกกรวด

สถานที่ทดสอบ ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดคละมวลรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูดซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 4 | 4.8 | | 5 | | | |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b-x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1298.2 | 1295.6 | 1298.5 | 1308.6 | 1309.1 | 1306.8 | | | |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1300.6 | 1296.8 | 1300.1 | 1309.8 | 1310.3 | 1307.7 | | | |
| Mass in Water g(g) | 778.1 | 773.7 | 776.3 | 781.3 | 780.2 | 778.7 | | | |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 522.5 | 523.1 | 523.8 | 528.5 | 530.1 | 529.0 | | | |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.485 | 2.477 | 2.479 | 2.476 | 2.470 | 2.470 | | | |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.480 | | | 2.472 | | | | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.5 | | | 10.4 | | | | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 87.1 | | | 86.8 | | | | | |
| VMA % (l):100-k | 12.9 | | | 13.2 | | | | | |
| Air Voids % (m):l-j | 2.4 | | | 2.7 | | | | | |
| VFB % (n):100*j/l | 81.2 | | | 79.2 | | | | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2645 | 2582 | 2776 | 2542 | 2531 | 2662 | | | |
| Adjust lbs | 2460 | 2479 | 2471 | 2364 | 2354 | 2369 | | | |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2470 | | | 2362 | | | | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 11 | 11 | 11 | 10 | 9 | 9 | | | |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 10.8 | | | 9.6 | | | | | |

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยเถ้าลอยลิกไนต์

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, เถ้าลอยลิกไนต์

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

สถานที่ทดสอบ และห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละมวบรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม (Gag) = 2.717

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 0.5 | 4.8 | | 1 | 4.8 | | 1.5 |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | 4.58 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | 4.34 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1249.4 | 1248.4 | 1251.4 | 1259.7 | 1258.4 | 1258.6 | 1264.1 | 1256.4 | 1260.9 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1252.5 | 1250.4 | 1256.0 | 1260.9 | 1259.4 | 1259.6 | 1264.8 | 1261.6 | 1262.1 |
| Mass in Water g(g) | 735.6 | 734.4 | 737.5 | 741.0 | 739.4 | 740.1 | 747.6 | 743.4 | 743.6 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 516.9 | 516.0 | 518.5 | 519.9 | 520.0 | 519.5 | 517.2 | 518.2 | 518.5 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.417 | 2.419 | 2.413 | 2.423 | 2.420 | 2.423 | 2.444 | 2.424 | 2.432 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.417 | | | 2.422 | | | 2.434 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.2 | | | 10.2 | | | 10.3 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 84.9 | | | 85.1 | | | 85.5 | | |
| VMA % (l):100-k | 15.1 | | | 14.9 | | | 14.5 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 4.9 | | | 4.7 | | | 4.2 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 67.5 | | | 68.5 | | | 70.7 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2519 | 2536 | 2485 | 2565 | 2428 | 2485 | 2542 | 2691 | 2645 |
| Adjust lbs | 2167 | 2257 | 2311 | 2283 | 2331 | 2311 | 2364 | 2314 | 2354 |
| เฉลี่ย เสถียรภาพ lbs | 2245 | | | 2308 | | | 2344 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 10 | 10 | 10 | 11 | 10 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 10.2 | | | 10.5 | | | 10.6 | | |

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, เถ้าลอยลิกไนต์

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

สถานที่ทดสอบ ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละมวบรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถฟ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถฟ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูซึมยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 2 | 4.8 | | 2.5 | 4.8 | | 3 |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | 4.58 | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | 4.34 | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1269.2 | 1268.6 | 1269.1 | 1276.4 | 1272.8 | 1277.3 | 1282.3 | 1282.6 | 1280.6 |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1271.1 | 1270.2 | 1270.8 | 1278.1 | 1274.4 | 1279.2 | 1282.9 | 1283.5 | 1282.6 |
| Mass in Water g(g) | 751.7 | 750.2 | 750.9 | 758.1 | 752.5 | 758.7 | 762.2 | 764.3 | 761.6 |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 519.4 | 520.0 | 519.9 | 520.0 | 521.9 | 520.5 | 520.7 | 519.2 | 521.0 |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.444 | 2.440 | 2.441 | 2.455 | 2.439 | 2.454 | 2.463 | 2.470 | 2.458 |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.442 | | | 2.449 | | | 2.464 | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.3 | | | 10.3 | | | 10.4 | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)/Gag | 85.8 | | | 86.0 | | | 86.6 | | |
| VMA % (l):100-k | 14.2 | | | 14.0 | | | 13.4 | | |
| Air Voids % (m):l-j | 3.9 | | | 3.6 | | | 3.1 | | |
| VFB % (n):100*j/l | 72.4 | | | 74.0 | | | 77.2 | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2565 | 2565 | 2691 | 2736 | 2719 | 2605 | 2611 | 2731 | 2811 |
| Adjust lbs | 2385 | 2385 | 2395 | 2435 | 2420 | 2423 | 2428 | 2430 | 2417 |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2389 | | | 2426 | | | 2425 | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 10 | 10 | 10 |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 10.9 | | | 10.6 | | | 10.1 | | |

ตารางผนวกที่ 6 ผลการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีตผสมแทรกด้วยเถ้าลอยลิกไนต์ (ต่อ)

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, เถ้าลอยลิกไนต์

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

สถานที่ทดสอบ ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

ขนาดกะละมวบรวม 1:2:3:4 = 54:19:12:15

แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60-70

ถพ.เฉลี่ยมวลรวม Filler (Gag) = 2.716

ถพ.แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Gac) = 1.03

จำนวนการบดอัด = 75

%การดูดซึ่มยาง (x) = 0.25

| No. ตัวอย่าง | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|--|
| %AC by Mass of Agg. (a) | 4.8 | | 4 | 4.8 | | 5 | | | |
| %AC by Mass of Mix (b) | 4.58 | | | 4.58 | | | | | |
| %Eff. AC by Mass of Mix(c) : $b \cdot x(100-b)/100$ | 4.34 | | | 4.34 | | | | | |
| Spec. Hgt. in(d) | | | | | | | | | |
| ความหนาแน่น | | | | | | | | | |
| Mass in Air g(e) | 1293.9 | 1292.9 | 1292.0 | 1307.5 | 1306.8 | 1305.9 | | | |
| Mass Sat. Surface Dry g(f) | 1295.1 | 1293.9 | 1293.8 | 1308.4 | 1308.9 | 1306.6 | | | |
| Mass in Water g(g) | 771.6 | 770.5 | 771.5 | 781.8 | 781.6 | 781.7 | | | |
| Bulk Volume ml (h):f-g | 523.5 | 523.4 | 522.3 | 526.6 | 527.3 | 524.9 | | | |
| Bulk Density g/ml (i):e/h | 2.472 | 2.470 | 2.474 | 2.483 | 2.478 | 2.488 | | | |
| เฉลี่ยความหนาแน่น | 2.472 | | | 2.483 | | | | | |
| VOIDS ANALYSIS | | | | | | | | | |
| Volume AC %Total (j):c*i/Gac | 10.4 | | | 10.5 | | | | | |
| Volume Agg %Total (k):(100-b)i/Gag | 86.8 | | | 87.2 | | | | | |
| VMA % (l):100-k | 13.2 | | | 12.8 | | | | | |
| Air Voids % (m):l-j | 2.7 | | | 2.3 | | | | | |
| VFB % (n):100*j/l | 79.2 | | | 82.0 | | | | | |
| เสถียรภาพ | | | | | | | | | |
| Measurement lbs | 2713 | 2588 | 2719 | 2548 | 2656 | 2691 | | | |
| Adjust lbs | 2415 | 2407 | 2420 | 2369 | 2364 | 2395 | | | |
| เฉลี่ยเสถียรภาพ lbs | 2414 | | | 2376 | | | | | |
| การไหล | | | | | | | | | |
| Measurement 1/100 in (0.25 mm) | 10 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | | | |
| เฉลี่ยการไหล 1/100 in (0.25 mm) | 9.6 | | | 8.9 | | | | | |

ตารางผนวกที่ 7 ผลการทดสอบโมดูลัสต้านทานโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส
วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ผสมแทรกซีเมนต์, ผสมแทรกฝุ่นหิน, ผสมแทรกเถ้าลอยลิกไนต์
แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโก้
สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.นเรศวร

| | Test No. | Thickness (mm.) | Diameter (mm.) | SMA. (MPa.) 1 | SMAm. (MPa.) 2 | Mean (MPa.) 1+2 | Mean (MPa.) |
|-----------------|----------|--------------------|-------------------|------------------|----------------------|--------------------|-------------|
| แอสฟัลต์คอนกรีต | 1 | 64.98 | 102.58 | 607.50 | 793.50 | 700.50 | 628.00 |
| | 2 | 63.40 | 102.60 | 542.00 | 676.50 | 609.25 | |
| | 3 | 63.50 | 102.00 | 565.00 | 621.50 | 593.25 | |
| | 4 | 64.42 | 102.36 | 581.00 | 637.00 | 609.00 | |
| ผสมเพิ่มซีเมนต์ | 1 | 65.74 | 101.64 | 936.00 | 655.00 | 795.50 | 824.73 |
| | 2 | 66.20 | 101.50 | 751.00 | 861.80 | 806.40 | |
| | 3 | 65.46 | 101.90 | 896.60 | 644.40 | 770.50 | |
| | 4 | 65.00 | 101.38 | 847.80 | 1005.20 | 926.50 | |
| ผสมเพิ่มฝุ่นหิน | 1 | 65.00 | 102.00 | 713.40 | 725.40 | 719.40 | 712.35 |
| | 2 | 64.00 | 102.00 | 740.20 | 690.00 | 715.10 | |
| | 3 | 65.00 | 101.80 | 669.60 | 760.20 | 714.90 | |
| | 4 | 65.00 | 102.00 | 589.20 | 810.80 | 700.00 | |
| ผสมเพิ่มเถ้าลอย | 1 | 65.00 | 102.00 | 537.00 | 446.80 | 491.90 | 631.98 |
| | 2 | 65.60 | 101.90 | 587.00 | 629.20 | 608.10 | |
| | 3 | 65.00 | 102.00 | 671.00 | 651.80 | 661.40 | |
| | 4 | 65.00 | 101.80 | 738.00 | 795.00 | 766.50 | |

ตารางผนวกที่ 8 ผลการทดสอบการดูดซึมยางวัสดุมวลรวม

วัสดุ มวลรวม, แอสฟัลต์ซีเมนต์

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโก้

สถานที่ทดลอง ส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรมทางหลวงที่ 8

| | | | |
|--|-------|---|--|
| Sample No. | | | |
| %AC by Mass of Aggregate | (a) | = | 6.00% |
| %AC by Mass of Total Mix | (b) | = | 5.66% |
| Mass of Flask in Water | (A) | = | 725.3g |
| Mass of Flask in Air | (B) | = | 1310.3g |
| Mass of Flask + Sample in Air | (C) | = | 2342.3g |
| Mass of Sample in Air = C-B | (D) | = | 1032.0g |
| Mass of Flask + Sample in Water after Evacuation | (E) | = | 1344.5g |
| Theoretical Maximum Specific Gravity | (Gm) | = | $\frac{D}{A + D - E}$ |
| | | = | 2.500 |
| Virtual Specific Gravity | (Gv) | = | $\frac{100 - b}{\left(\frac{100}{Gm}\right) - \left(\frac{b}{Gac}\right)}$ |
| | | = | 2.734 |
| Bulk Specific Gravity of Mix Aggregate | (Gag) | = | 2.717 |
| Asphalt Lost by Absorption | (Aac) | = | $\frac{100 (Gv - Gag) Gac}{(Gv)(Gag)}$ |
| | | = | 0.25% |

ตารางผนวกที่ 9 ผลการทดสอบ SPECIFIC GRAVITY OF BLEND

วัสดุ มวลรวม

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

Retained # 200 GB = 2.698 GA = 2.760

Passing # 200 GA = 2.753

Blend Sp.Gr. = 2.703

| Description | Lime (L) | Bin 1 (B1) | Bin 2 (B2) | Bin 3 (B3) | Bin 4 (B4) |
|--------------------------------|----------|------------|------------|------------|------------|
| Bluk Specific Gravity (GB) | - | 2.703 | 2.725 | 2.758 | 2.722 |
| Apparent Specific Gravity (GA) | - | 2.756 | 2.770 | 2.788 | 2.761 |
| Flakiness Index (F.I.) | - | - | 26 | 28 | 30 |
| Elongation Index (E.I.) | - | - | 7 | 28 | 23 |
| %Passing Sieve # 4 (P) | - | 92.9 | 14.5 | 0.4 | 0.6 |
| Mix Proportion (H) | - | 54 | 19 | 12 | 15 |

$$\text{Apparent Specific Gravity Blend} = \frac{100}{\left(\frac{HB1}{GA1}\right) + \left(\frac{HB2}{GA2}\right) + \left(\frac{HB3}{GA3}\right) + \left(\frac{HB4}{GA4}\right)}$$

$$\text{Blend GA} = 2.763$$

$$\text{Bluk Specific Gravity Blend} = \frac{100}{\left(\frac{HB1}{GB1}\right) + \left(\frac{HB2}{GB2}\right) + \left(\frac{HB3}{GB3}\right) + \left(\frac{HB4}{GB4}\right)}$$

$$\text{Blend GB} = 2.717$$

$$\text{Flakiness Index of Total Agg.} = \frac{F.I.2(100-P2)HB2 + F.I.3(100-P3)HB3 + F.I.4(100-P4)HB4}{(100-P2)HB2 + (100-P3)HB3 + (100-P4)HB4}$$

$$= 28$$

$$\text{Elongation Index of Total Agg.} = \frac{E.I.2(100-P2)HB2 + E.I.3(100-P3)HB3 + E.I.4(100-P4)HB4}{(100-P2)HB2 + (100-P3)HB3 + (100-P4)HB4}$$

$$= 18$$

ตารางผนวกที่ 10 ผลการทดสอบ Sieve Analysis

วัสดุ ซีเมนต์, ฝุ่นหิน, เถ้าลอยลิกไนต์

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve No. | | First Trial | | | Second Trial | | | Average % Passing |
|-----------|------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|----------------------|
| | | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | |
| cement | #30 | 0 | 223.61 | 100.0 | 0 | 222.09 | 100.0 | 100.0 |
| | #50 | 1.91 | 221.70 | 99.1 | 1.22 | 220.87 | 99.5 | 99.3 |
| | #100 | 22.17 | 199.53 | 89.2 | 19.42 | 201.45 | 90.7 | 90.0 |
| | #200 | 40.48 | 159.05 | 71.1 | 41.87 | 159.58 | 71.9 | 71.5 |
| Rock dust | #30 | 0 | 207.10 | 100.0 | 0 | 207.76 | 100.0 | 100.0 |
| | #50 | 0.08 | 207.02 | 100.0 | 0.07 | 207.69 | 100.0 | 100.0 |
| | #100 | 4.29 | 202.73 | 97.9 | 4.37 | 203.32 | 97.9 | 97.9 |
| | #200 | 25.62 | 177.11 | 85.5 | 24.75 | 178.57 | 86.0 | 85.7 |
| Fly ash | #30 | 0 | 200.09 | 100.0 | 0 | 201.96 | 100.0 | 100.0 |
| | #50 | 0.82 | 199.27 | 99.6 | 1.16 | 200.80 | 99.4 | 99.5 |
| | #100 | 11.67 | 187.60 | 93.8 | 11.57 | 189.23 | 93.7 | 93.7 |
| | #200 | 33.7 | 153.90 | 76.9 | 34.8 | 154.43 | 76.5 | 76.7 |

ตารางผนวกที่ 11 ผลการทดสอบ Bin Combination

วัสดุ มวลรวม

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

Bin1:Bin2:Bin3:Bin4 = 54:19:12:15 by mass

| Sieve Size | % Passing | | | | Combined |
|------------|-----------|--------|--------|--------|----------|
| | Bin 1 | Bin 2 | Bin 3 | Bin 4 | |
| 1 1/2" | | | | | |
| 1" | | | | | |
| 3/4" | | | | 100.00 | 100.00 |
| 1/2" | | 100.00 | 100.00 | 59.97 | 94.00 |
| 3/8" | 100.00 | 99.94 | 72.23 | 25.31 | 85.45 |
| # 4 | 92.89 | 14.50 | 0.43 | 0.59 | 53.06 |
| # 8 | 50.44 | 1.07 | 0.25 | 0.35 | 27.52 |
| # 16 | 28.60 | 0.64 | 0.24 | | 15.59 |
| # 30 | 19.60 | 0.63 | | | 10.70 |
| # 50 | 14.67 | | | | 7.92 |
| # 100 | 11.34 | | | | 6.12 |
| # 200 | 9.28 | | | | 5.01 |

ตารางผนวกที่ 12 ผลการทดสอบ Sieve Analysis Aggregate

วัสดุ หินฝุ่น Hot Bin 1

แหล่งวัสดุ โรงไม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve No. | First Trial | | | Second Trial | | | Average % Passing |
|-----------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|----------------------|
| | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | |
| #4 | 65.72 | 873.30 | 93.0 | 57.00 | 733.18 | 92.8 | 92.89 |
| #8 | 376.79 | 496.51 | 52.9 | 353.88 | 379.30 | 48.0 | 50.44 |
| #16 | 211.76 | 284.75 | 30.3 | 166.96 | 212.34 | 26.9 | 28.60 |
| #30 | 90.77 | 193.98 | 20.7 | 65.89 | 146.45 | 18.5 | 19.60 |
| #50 | 48.52 | 145.46 | 15.5 | 36.95 | 109.50 | 13.9 | 14.67 |
| #100 | 32.87 | 112.59 | 12.0 | 25.01 | 84.49 | 10.7 | 11.34 |
| #200 | 20.46 | 92.13 | 9.8 | 15.41 | 69.08 | 8.7 | 9.28 |

ตารางผนวกที่ 13 ผลการทดสอบ Sieve Analysis Aggregate

วัสดุ หิน 3/8" Hot Bin 2

แหล่งวัสดุ โรงไม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve No. | First Trial | | | Second Trial | | | Average % Passing |
|-----------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|----------------------|
| | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | |
| 3/8" | 2.50 | 2114.79 | 99.9 | - | 1510.40 | 100.0 | 99.9 |
| #4 | 1808.82 | 305.97 | 14.5 | 1290.56 | 219.84 | 14.6 | 14.5 |
| #8 | 283.04 | 22.93 | 1.1 | 203.73 | 16.11 | 1.1 | 1.1 |
| #16 | 9.82 | 13.11 | 0.6 | 6.25 | 9.86 | 0.7 | 0.6 |
| #30 | 0.00 | 13.11 | 0.6 | 0.21 | 9.65 | 0.6 | 0.6 |

ตารางผนวกที่ 14 ผลการทดสอบ Sieve Analysis Aggregate

วัสดุ หิน 1/2" Hot Bin 3

แหล่งวัสดุ โรงไม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve No. | First Trial | | | Second Trial | | | Average % Passing |
|-----------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|----------------------|
| | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | |
| 1/2" | - | 2479.53 | 100.0 | - | 2422.57 | 100.0 | 100.0 |
| 3/8" | 651.33 | 1828.20 | 73.7 | 709.19 | 1713.38 | 70.7 | 72.2 |
| #4 | 1816.21 | 11.99 | 0.5 | 1704.14 | 9.24 | 0.4 | 0.4 |
| #8 | 5.27 | 6.72 | 0.3 | 3.61 | 5.63 | 0.2 | 0.3 |

ตารางผนวกที่ 15 ผลการทดสอบ Sieve Analysis Aggregate

วัสดุ หิน 3/4" Hot Bin 4

แหล่งวัสดุ โรงไม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve No. | First Trial | | | Second Trial | | | Average % Passing |
|-----------|-----------------|-------------|----------------|-----------------|-------------|----------------|----------------------|
| | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | Retained (g) | Passing (g) | Passing (%) | |
| 3/4" | - | 5345.66 | 100.0 | - | 5345.66 | 100.0 | 100.0 |
| 1/2" | 2139.69 | 3205.97 | 60.0 | 2139.69 | 3205.97 | 60.0 | 60.0 |
| 3/8" | 1852.84 | 1353.13 | 25.3 | 1852.84 | 1353.13 | 25.3 | 25.3 |
| #4 | 1321.81 | 31.32 | 0.6 | 1321.81 | 31.32 | 0.6 | 0.6 |

ตารางผนวกที่ 16 ผลการทดสอบ Flakiness Index and Elongation Index

วัสดุ หิน 3/8" Hot Bin 2

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

Flakiness Index

| Sieve Size | | Width of Slot Sieve | | Mass of Aggregate (g) | | | Flakiness index % |
|-------------|-----------|------------------------|---------|-----------------------|--------------|--------------|----------------------|
| | | | | Retained A | Passing B | Total A+B | |
| (mm) | (in.) | (mm) | (in.) | | | | |
| 63.50-50.80 | (2 1/2-2) | 34.29 | (1.350) | | | | |
| 50.80-38.10 | (2-1 1/2) | 26.67 | (1.050) | | | | |
| 38.10-25.40 | (1 1/2-1) | 19.05 | (0.750) | | | | |
| 25.40-19.05 | (1-3/4) | 13.34 | (0.525) | | | | |
| 19.05-12.70 | (3/4-1/2) | 9.53 | (0.375) | | | | |
| 12.70-9.52 | (1/2-3/8) | 6.68 | (0.263) | | | | |
| 9.52-4.75 | (3/8-#4) | 4.29 | (0.169) | 740.31 | 266.12 | 1006 | |
| Total | | | | 740.31 | 266.12 | 1006 | 26 |

Elongation Index

| Sieve Size | | Width of Slot Sieve | | Mass of Aggregate (g) | | | Elongation index % |
|-------------|-----------|------------------------|---------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| | | | | Retained C | Passing D | Total C+D | |
| (mm) | (in.) | (mm) | (in.) | | | | |
| 63.50-50.80 | (2 1/2-2) | 34.29 | (1.350) | | | | |
| 50.80-38.10 | (2-1 1/2) | 26.67 | (1.050) | | | | |
| 38.10-25.40 | (1 1/2-1) | 19.05 | (0.750) | | | | |
| 25.40-19.05 | (1-3/4) | 13.34 | (0.525) | | | | |
| 19.05-12.70 | (3/4-1/2) | 9.53 | (0.375) | | | | |
| 12.70-9.52 | (1/2-3/8) | 6.68 | (0.263) | | | | |
| 9.52-4.75 | (3/8-#4) | 4.29 | (0.169) | 68.93 | 937.5 | 1006 | |
| Total | | | | 68.93 | 937.5 | 1006 | 7 |

ตารางผนวกที่ 17 ผลการทดสอบ Flakiness Index and Elongation Index

วัสดุ หิน 1/2" Hot Bin 3

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

Flakiness Index

| Sieve Size | Width of Slot Sieve | Mass of Aggregate (g) | | | Flakiness index % |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|-----------|----------------------|
| | | Retained A | Passing B | Total A+B | |
| (mm) (in.) | (mm) (in.) | | | | |
| 63.50-50.80 (2 1/2-2) | 34.29 (1.350) | | | | |
| 50.80-38.10 (2-1 1/2) | 26.67 (1.050) | | | | |
| 38.10-25.40 (1 1/2-1) | 19.05 (0.750) | | | | |
| 25.40-19.05 (1-3/4) | 13.34 (0.525) | | | | |
| 19.05-12.70 (3/4-1/2) | 9.53 (0.375) | | | | |
| 12.70-9.52 (1/2-3/8) | 6.68 (0.263) | 626.36 | 252.38 | 879 | |
| 9.52-4.75 (3/8-#4) | 4.29 (0.169) | 834.96 | 314.25 | 1149 | |
| Total | | 1461.32 | 566.63 | 2028 | 28 |

Elongation Index

| Sieve Size | Width of Slot Sieve | Mass of Aggregate (g) | | | Elongation index % |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| | | Retained C | Passing D | Total C+D | |
| (mm) (in.) | (mm) (in.) | | | | |
| 63.50-50.80 (2 1/2-2) | 34.29 (1.350) | | | | |
| 50.80-38.10 (2-1 1/2) | 26.67 (1.050) | | | | |
| 38.10-25.40 (1 1/2-1) | 19.05 (0.750) | | | | |
| 25.40-19.05 (1-3/4) | 13.34 (0.525) | | | | |
| 19.05-12.70 (3/4-1/2) | 9.53 (0.375) | | | | |
| 12.70-9.52 (1/2-3/8) | 6.68 (0.263) | 103.52 | 775.32 | 879 | |
| 9.52-4.75 (3/8-#4) | 4.29 (0.169) | 472.51 | 676.6 | 1149 | |
| Total | | 576.03 | 1451.92 | 2028 | 28 |

ตารางผนวกที่ 18 ผลการทดสอบ Flakiness Index and Elongation Index

วัสดุ หิน 3/4" Hot Bin 4

แหล่งวัสดุ โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

Flakiness Index

| Sieve Size | Width of Slot Sieve | Mass of Aggregate (g) | | | Flakiness index % |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|----------------------|
| | | Retained A | Passing B | Total A+B | |
| (mm) (in.) | (mm) (in.) | | | | |
| 63.50-50.80 (2 1/2-2) | 34.29 (1.350) | | | | |
| 50.80-38.10 (2-1 1/2) | 26.67 (1.050) | | | | |
| 38.10-25.40 (1 1/2-1) | 19.05 (0.750) | | | | |
| 25.40-19.05 (1-3/4) | 13.34 (0.525) | | | | |
| 19.05-12.70 (3/4-1/2) | 9.53 (0.375) | 2013.43 | 997.57 | 3011 | |
| 12.70-9.52 (1/2-3/8) | 6.68 (0.263) | 1079.63 | 340.41 | 1420 | |
| 9.52-4.75 (3/8-#4) | 4.29 (0.169) | 541.74 | 193.35 | 735 | |
| Total | | 3634.8 | 1531.33 | 5166 | 30 |

Elongation Index

| Sieve Size | Width of Slot Sieve | Mass of Aggregate (g) | | | Elongation index % |
|-----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|-----------------------|
| | | Retained C | Passing D | Total C+D | |
| (mm) (in.) | (mm) (in.) | | | | |
| 63.50-50.80 (2 1/2-2) | 34.29 (1.350) | | | | |
| 50.80-38.10 (2-1 1/2) | 26.67 (1.050) | | | | |
| 38.10-25.40 (1 1/2-1) | 19.05 (0.750) | | | | |
| 25.40-19.05 (1-3/4) | 13.34 (0.525) | | | | |
| 19.05-12.70 (3/4-1/2) | 9.53 (0.375) | 233.10 | 2777.65 | 3011 | |
| 12.70-9.52 (1/2-3/8) | 6.68 (0.263) | 505.94 | 914.31 | 1420 | |
| 9.52-4.75 (3/8-#4) | 4.29 (0.169) | 427.08 | 308.05 | 735 | |
| Total | | 1166.12 | 4000.01 | 5166 | 23 |

ตารางผนวกที่ 19 ผลการทดสอบ Specific Gravity and Density

วัสดุ แอสฟัลต์ซีเมนต์ AC 60/70

แหล่งวัสดุ แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโป้

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Test No. | 1 | 2 |
|--|--------|--------|
| Pycnometer No. | | |
| Temperature, °C | 25 | 25 |
| Mass of Pycnometer plus Stopper (A),g | 31.95 | 31.93 |
| Mass of Pycnometer Filled with Water (B),g | 56.74 | 56.77 |
| Mass of Pycnometer Partially Filled with Asphalt (C),g | 45.97 | 45.99 |
| Mass of Pycnometer plus Asphalt plus Water (D),g | 57.20 | 57.17 |
| Specific Gravity of Bituminous Materials = $\frac{(C - A)}{[(B - A) - (D - C)]}$ | 1.034 | 1.029 |
| Density of Water (W_T),g/cm ³ | 0.9971 | 0.9971 |
| Density of Bituminous Materials = Specific Gravity x W_T | 1.03 | 1.03 |

ตารางผนวกที่ 20 ผลการทดสอบ Specific Gravity Test

วัสดุ Passing #200 Hot Bin 1

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|-----------------------------|---|---------|
| Mass Pycnometer + SSD Sample | = | - | g | Mass Container + Dry Sample | = | 478.95g |
| Mass Pycnometer | = | - | g | Mass Container | = | 189.70g |
| Mass SSD Sample (A) | = | - | g | Mass Dry Sample (B) | = | 289.25g |

| Determination No. | | 1 | 2 | 3 |
|--|------|--------|--------|--------|
| Temperature (t) | °C | 45 | 40 | 35 |
| Density of Water (dt) | g/ml | 0.9902 | 0.9922 | 0.9941 |
| Mass Pycnometer + Water + Sample (W1) | g | 837.47 | 838.18 | 838.67 |
| Mass Pycnometer + Water (W2) | g | 651.78 | 652.86 | 653.56 |
| Apparent Specific Gravity | | | | |
| GA(t °C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | | 2.766 | 2.761 | 2.761 |
| GA(30°C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | | 2.750 | 2.752 | 2.757 |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basis) | | | | |
| GB(t °C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | | - | - | - |
| GB(30°C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | | - | - | - |

Average GA (30°C) = 2.753

Average GB (30°C) = -

%Water Absorption = $\frac{A - B}{B} \times 100 =$ -

ตารางผนวกที่ 21 ผลการทดสอบ Specific Gravity Test

วัสดุ Retained #200 Hot Bin 1

แหล่งวัสดุ โรงไม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| | | | |
|------------------------------|------------|-----------------------------|------------|
| Mass Pycnometer + SSD Sample | = 656.75 g | Mass Container + Dry Sample | = 733.47 g |
| Mass Pycnometer | = 158.34 g | Mass Container | = 239.13 g |
| Mass SSD Sample (A) | = 498.41 g | Mass Dry Sample (B) | = 494.34 g |

| Determination No. | 1 | 2 | 3 |
|--|--------|--------|--------|
| Temperature (t) °C | 45 | 40 | 35 |
| Density of Water (dt) g/ml | 0.9902 | 0.9922 | 0.9941 |
| Mass Pycnometer + Water + Sample (W1) g | 969.32 | 970.12 | 970.55 |
| Mass Pycnometer + Water (W2) g | 651.78 | 652.86 | 653.56 |
| Apparent Specific Gravity | | | |
| GA(t °C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | 2.769 | 2.770 | 2.771 |
| GA(30 °C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | 2.753 | 2.760 | 2.766 |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basis) | | | |
| GB(t °C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | 2.706 | 2.708 | 2.709 |
| GB(30 °C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | 2.691 | 2.698 | 2.704 |

Average GA (30 °C) = 2.760

Average GB (30 °C) = 2.698

$$\% \text{Water Absorption} = \frac{A - B}{B} \times 100 = 0.823$$

ตารางผนวกที่ 22 ผลการทดสอบ Specific Gravity Test

วัสดุ ฝุ่นหิน

แหล่งวัสดุ โรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ต.โคกกรวด อ.เมือง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|-----------------------------|---|---------|
| Mass Pycnometer + SSD Sample | = | - | g | Mass Container + Dry Sample | = | 762.32g |
| Mass Pycnometer | = | - | g | Mass Container | = | 600.09g |
| Mass SSD Sample (A) | = | - | g | Mass Dry Sample (B) | = | 162.23g |

| Determination No. | | 1 | 2 | 3 |
|---|------|--------|--------|--------|
| Temperature (t) | °C | 45 | 40 | 35 |
| Density of Water (dt) | g/ml | 0.9902 | 0.9922 | 0.9941 |
| Mass Pycnometer + Water + Sample (W1) | g | 755.31 | 756.39 | 756.84 |
| Mass Pycnometer + Water (W2) | g | 652.04 | 653.01 | 653.76 |
| Apparent Specific Gravity | | | | |
| GA(t°C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | | 2.725 | 2.735 | 2.727 |
| GA(30°C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | | 2.710 | 2.726 | 2.722 |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basis) | | | | |
| GB(t°C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | | - | - | - |
| GB(30°C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | | - | - | - |

Average GA (30°C) = 2.719

Average GB (30°C) = -

%Water Absorption = $\frac{A - B}{B} \times 100 =$ -

ตารางผนวกที่ 23 ผลการทดสอบ Specific Gravity Test

วัสดุ แก้วลอยติกไนต์

แหล่งวัสดุ โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| | | | | | | |
|------------------------------|---|---|---|-----------------------------|---|---------|
| Mass Pycnometer + SSD Sample | = | - | g | Mass Container + Dry Sample | = | 478.95g |
| Mass Pycnometer | = | - | g | Mass Container | = | 189.70g |
| Mass SSD Sample (A) | = | - | g | Mass Dry Sample (B) | = | 289.25g |

| Determination No. | | 1 | 2 | 3 |
|---|------|--------|--------|--------|
| Temperature (t) | °C | 45 | 40 | 35 |
| Density of Water (dt) | g/ml | 0.9902 | 0.9922 | 0.9941 |
| Mass Pycnometer + Water + Sample (W1) | g | 857.38 | 858.18 | 858.89 |
| Mass Pycnometer + Water (W2) | g | 651.78 | 652.86 | 653.56 |
| Apparent Specific Gravity | | | | |
| GA(t°C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | | 2.448 | 2.448 | 2.453 |
| GA(30°C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | | 2.435 | 2.440 | 2.449 |
| Bulk Specific Gravity (Oven-Dry Basis) | | | | |
| GB(t°C) = $\frac{B \times dt}{(B + W2 - W1)}$ | | - | - | - |
| GB(30°C) = $\frac{GA \times dt}{0.9957}$ | | - | - | - |

Average GA (30°C) = 2.441

Average GB (30°C) = -

%Water Absorption = $\frac{A - B}{B} \times 100 =$ -

ตารางผนวกที่ 24 ผลการทดสอบ Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate

วัสดุ Hot Bin 2, 3, 4

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve No. | | Mass of Sample | | | GB | GA | Absorption (%) |
|-----------|---|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------------------|
| | | In Oven - Dry Condition (g) [A] | In SSD condition (g) [B] | Immersed in Water (g) [C] | $\frac{A}{B - C}$ | $\frac{A}{A - C}$ | $\frac{(B - A)}{A} \times 100$ |
| Hot bin 2 | 1 | 916.77 | 922.13 | 585.37 | 2.722 | 2.766 | 0.585 |
| | 2 | 981.71 | 987.62 | 629.30 | 2.740 | 2.786 | 0.602 |
| | 3 | 911.05 | 916.22 | 580.56 | 2.714 | 2.757 | 0.567 |
| | | | | | | | |
| total | | 2809.53 | 2825.97 | 1795.23 | 2.725 | 2.770 | 0.585 |
| Average | | | | | | | |
| Hot bin 3 | 1 | 936.53 | 940.15 | 600.73 | 2.759 | 2.789 | 0.387 |
| | 2 | 979.02 | 982.93 | 627.82 | 2.757 | 2.788 | 0.399 |
| | 3 | 971.39 | 975.10 | 623.03 | 2.759 | 2.788 | 0.382 |
| | | | | | | | |
| total | | 2886.94 | 2898.18 | 1851.58 | 2.758 | 2.788 | 0.389 |
| Average | | | | | | | |
| Hot bin 4 | 1 | 1032.55 | 1037.87 | 656.10 | 2.705 | 2.743 | 0.515 |
| | 2 | 952.80 | 957.89 | 609.36 | 2.734 | 2.774 | 0.534 |
| | 3 | 1011.15 | 1016.40 | 645.51 | 2.726 | 2.765 | 0.519 |
| | | | | | | | |
| total | | 2996.50 | 3012.16 | 1910.97 | 2.722 | 2.761 | 0.523 |
| Average | | | | | | | |

ตารางผนวกที่ 25 ผลการทดสอบ Sand Equivalent Test

วัสดุ Hot Bin 1

แหล่งวัสดุ โรงไม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรมทางหลวงที่ 8

| Sample No. | Sand Reading | Clay Reading | Sand Equivalent = $\frac{\text{Sand Reading}}{\text{Clay Reading}} \times 100 =$ |
|------------|--------------|--------------|--|
| 1 | 3.3 | 4.7 | 70% |
| 2 | 3.4 | 4.8 | 71% |
| | | Average = | 71% |

ตารางผนวกที่ 26 ผลการทดสอบ Abrasion Test of Coarse Aggregate by Los Angeles Machine

วัสดุ หิน 3/4"

แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ส่วนตรวจสอบวิเคราะห์ทางวิศวกรรมกรมทางหลวงที่ 8

| Sieve Size | | Accumulative |
|---|-------------|---------------------|
| Passing | Retained on | Mass of Sample, (g) |
| 3/4" | 1/2" | 2500 |
| 1/2" | 3/8" | 2500 |
| Original Mass of Sample (W_1) | | 5000 |
| Final Mass of Sample (W_2) | | 3810 |
| Loss ($W_1 - W_2$) | | 1190 |
| Percentage of Wear = $\frac{(W_1 - W_2)}{W_2} \times 100$ | | 31.23 % |

ตารางผนวกที่ 27 ผลการทดสอบ Soundness Test of Aggregate

วัสดุ หิน 3/4" Coarse Aggregate

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve Size (mm) | % Retained of Original Sample | Mass of Test Fraction Before Test,(g) | Mass of Test Fraction After Test, (g) | Actual Loss, (g) | Actual % Loss, (g) | Weighted % Loss |
|--------------------|-------------------------------------|---|---|---------------------|-----------------------|--------------------|
| 37.5-19.0 | 3.5 | - | - | - | 0.34 | 0.01 |
| 19.0-9.5 | 45.2 | 1010.4 | 1007 | 3.4 | 0.34 | 0.15 |
| 9.5-4.75 | 47.1 | 300.6 | 296 | 4.6 | 1.53 | 0.72 |
| Minus 4.75 | 4.2 | - | - | - | 1.53 | 0.06 |
| | | | | | Total % Loss | 0.95 |

ตารางผนวกที่ 28 ผลการทดสอบ Soundness Test of Aggregate

วัสดุ หินฝุ่น Fine Aggregate

แหล่งวัสดุ โรงโม้หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา

สถานที่ทดลอง ห้องทดสอบวัสดุการทาง ม.เทคโนโลยีสุรนารี

| Sieve Size (mm) | % Retained of Original Sample | Mass of Test Fraction Before Test,(g) | Mass of Test Fraction After Test, (g) | Actual Loss, (g) | Actual % Loss, (g) | Weighted % Loss |
|--------------------|-------------------------------------|---|---|---------------------|-----------------------|--------------------|
| 9.5-4.25 | 4.7 | - | - | - | 5.0 | 0.24 |
| 4.25-2.36 | 18.0 | 100 | 95.0 | 5.0 | 5.0 | 0.90 |
| 2.36-1.18 | 26.4 | 100 | 96.3 | 3.7 | 3.7 | 0.98 |
| 1.18-0.60 | 18.2 | 100 | 96.0 | 4.0 | 4.0 | 0.73 |
| 0.60-0.30 | 11.9 | 100 | 95.8 | 4.2 | 4.2 | 0.50 |
| Minus 0.30 | 19.0 | - | - | - | 4.2 | 0.80 |
| | | | | | Total % Loss | 4.1 |

ตารางผนวกที่ 29 ตารางคำนวณค่าวัสดุต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร

วัสดุ แอสฟัลต์คอนกรีต, ผสมแทรกซีเมนต์, ผสมแทรกฝุ่นหิน, ผสมแทรกเถ้าลอยลิกไนต์
แหล่งวัสดุ โรงโมหิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา, แอสฟัลต์ซีเมนต์บริษัทปิโก้,
โรงผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต ต.โคกกรวด, โรงไฟฟ้าแม่เมาะ

| รายการคำนวณ | หน่วย | แอสฟัลต์คอนกรีต | ผสมเพิ่ม ซีเมนต์ | ผสมเพิ่ม ฝุ่นหิน | ผสมเพิ่มเถ้าลอย ลิกไนต์ |
|---------------------------------------|-------|-----------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| น้ำหนักแอสฟัลต์ซีเมนต์ | | 2,418×0.048 | 2,418×0.048 | 2,418×0.048 | 2,418×0.048 |
| = | Kg. | 116.06 | 116.06 | 116.06 | 116.06 |
| น้ำหนักวัสดุผสมเพิ่ม | | 2,418×0.000 | 2,418×0.020 | 2,418×0.025 | 2,418×0.030 |
| = | Kg. | 0.00 | 48.36 | 60.45 | 72.54 |
| ใน 1 ลูกบาศก์เมตรจะมี | | | | | |
| แอสฟัลต์ซีเมนต์ | Kg. | 116.06 | 116.06 | 116.06 | 116.06 |
| วัสดุผสมเพิ่ม | Kg. | 0.00 | 48.36 | 60.45 | 72.54 |
| ราคาแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่อ 1 ตัน* | บาท | 13,000.00 | 13,000.00 | 13,000.00 | 13,000.00 |
| ราคาแอสฟัลต์ซีเมนต์ต่อ 1 ลบ.ม. | บาท | 1,508.83 | 1,508.83 | 1,508.83 | 1,508.83 |
| ราคารวมรวม ต่อ 1 ลบ.ม.* | บาท | 350.00 | 350.00 | 350.00 | 350.00 |
| ราคาวัสดุผสมเพิ่มต่อ 1 ตัน* | บาท | 0.00 | 2,400.00 | 0.00 | 115.00 |
| ราคาวัสดุผสมเพิ่ม ต่อ 1 ลบ.ม. | บาท | 0.00 | 116.07 | 0.00 | 8.34 |
| รวมราคาแอสฟัลต์คอนกรีต ต่อ 1 ลบ.ม. | บาท | 1,858.83 | 1,974.90 | 1,858.83 | 1,867.17 |

หมายเหตุ : *ราคาคำนวณขึ้นอยู่กับวันเวลาและสถานที่จำหน่าย

ภาคผนวก ข

บทความผลงานวิจัยที่น่าสนใจในการประชุมวิชาการ
ขนส่งแห่งชาติ ครั้งที่ 6

การศึกษาประสิทธิภาพของการใช้ ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์เป็นวัสดุผสมเพิ่มในแอสฟัลต์คอนกรีต

STUDY ON THE EFFICIENCY OF USING ROCK DUST AND FLY ASH

AS ADDITIVES TO ASPHALT CONCRETE

มานิตย์ เชิดชูนคร (Manit Cherdchoonakhorn)¹ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรยุทธ ลิมานนท์ (Asst.Prof.Dr.Thirayoot Limanond)²¹ นักศึกษาปริญญาโทสาขาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี manitnut@gmail.com² อาจารย์สาขาวิศวกรรมขนส่ง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี tlimanond@yahoo.com

บทคัดย่อ : ปัจจุบันการเดินทางด้วยรถยนต์มีจำนวนมากขึ้น ทำให้ต้องมีการพัฒนาถนนให้สมบูรณ์อยู่เสมอ ผิวจราจรถือเป็นส่วนสำคัญในอันดับแรกที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมาก เพราะด้วยการใช้งานที่มีอยู่ตลอด ทำให้ผิวจราจรมีการสึกหลอเร็วขึ้น เมื่อเป็นเช่นนั้นจะทำให้ถนนขรุขระและเกิดอุบัติเหตุทางถนนได้ง่าย ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุธรรมชาติมาใช้ในการก่อสร้างจำนวนมาก ทำให้ทรัพยากรบางประเภทลดน้อยลง ดังนั้นการศึกษานี้จะเป็นการทดลองนำฝุ่นหินที่เหลือจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต และเถ้าลอยที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหินลิกไนต์จากโรงไฟฟ้าแม่เมาะ มาเป็นวัสดุผสมเพิ่มในส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้จะใช้ยาง AC 60-70 เท่ากับ 4.0, 4.5, 5.0, 5.5 และ 6.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต เมื่อได้ค่าเปอร์เซ็นต์ยางที่เหมาะสมแล้วจะทำการผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหินและเถ้าลอยซึ่งจะใช้ในการวิจัยครั้งนี้เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 4.0 และ 5.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยใช้ส่วนผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นตัวเปรียบเทียบ จากนั้นจะดูความเหมาะสมของค่าที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์ยางกับ 1.ความหนาแน่น (Density) 2.เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ (%Air Voids) 3.ค่าการไหล (Flow) 4.เสถียรภาพ (Stability) 5.เปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกละแวกด้วยแอสฟัลต์ (%Voids Filled with Bitumen, VFB) และ 6.เปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุมวลรวม (%Voids in Mineral Aggregate, VMA) ให้ตรงตามมาตรฐานกรมทางหลวง โดยจะใช้การทดลองด้วยวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐาน ASTM D1559-82และทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม

ABSTRACT : Nowadays, usage of automobile is rapidly increasing. Therefore, needs for developments of roadways are considered high priority. The primary concern is the surface of streets. Since it is used all time, the surface wears out very quickly causing potholes and roughness and, subsequently resulting accidents to occur very easily. Presently, many natural materials are being used in road constructions causing rapid decrement in such resources. This experiment uses rock dust left from asphalt concrete manufacturing and fly ash, by-product from burning of lignite from Mae Moh Power Plant, as additives to asphalt concrete compound. This research will use the AC 60-70 rubber in the amount of 4, 4.5, 5, 5.5 and 6 percent by weight, respectively, as additive to the asphalt concrete compound. Then, when an appropriate percentage is obtained, No.1 Portland cement, rock dust and fly ash, in the amount of 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 and 5 percent, respectively, will be added using No. 1 Portland cement compound as reference. Finally, the study will observe which one of the values, resulted in graph showing the relation between percentages of rubber added and 1. Density, 2. %Air Voids, 3. Flow, 4. Stability, 5. %Voids Filled with Bitumen (VFB), and 6. %Voids in Mineral Aggregate (VMA). The experiment uses Marshal's procedure under the ASTM D1559-82 standards and Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus.

KEYWORDS : Rock Dust, Fly Ash, Marshal's, Indirect Tensile Stiffness Modulus

การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6

โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, 28-30 ตุลาคม 2552

1. บทนำ

ปัจจุบันการเดินทางด้วยรถยนต์มีจำนวนมาก ทำให้ต้องมีการก่อสร้างและบำรุงรักษาดถนนให้มีสมบูรณ์และพร้อมใช้งานอยู่เสมอ สำหรับการเดินทางนั้นผิวจราจรถือเป็นส่วนสำคัญในอันดับแรกที่ต้องให้ความสำคัญอย่างมาก เพราะด้วยการใช้งานที่มีอยู่ตลอดเวลาทำให้ผิวจราจรมีการสึกหรอเร็วขึ้น เมื่อเป็นเช่นนั้นจะสามารถเกิดความเสียหายต่างๆได้เช่น 1.ทำให้เกิดอุบัติเหตุทางถนนได้ง่าย 2.ทำให้เครื่องยนต์เกิดการเสียหาย ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาเพิ่มขึ้น เป็นต้น

กระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตจะมีส่วนประกอบที่สำคัญคือ ยางแอสฟัลต์ซีเมนต์ (ในประเทศไทยนิยมใช้ยางเกรด AC 60/70) และวัสดุผสมรวมตามขนาดที่กำหนด ซึ่งในกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต (Asphalt Concrete) แบบร้อน (Hot Mix) จะให้ความสำคัญกับการผลิตเป็นพิเศษ เพราะด้วยขั้นตอนการผลิตที่จะต้องมีความร้อนสูงมากกว่า 150°C (302°F) ส่วนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีต นั้นวัสดุผสมรวมจะต้องมีความสะอาดและขนาดตรงตามมาตรฐานที่กำหนด จึงต้องมีตะแกรงแบ่งขนาดและการเป่าฝุ่นหินที่มีขนาดเล็กทิ้งไป ทำให้ฝุ่นหินที่เหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตมีจำนวนมาก

รูปที่ 1 แสดงการเป่าออกของฝุ่นหินจากกระบวนการผลิต



ในการผลิตกระแสไฟฟ้าที่โรงไฟฟ้าแม่เมาะจังหวัดลำปาง เชื้อเพลิงสำคัญที่นำมาใช้ผลิตกระแสไฟฟ้านั้นได้มาจากถ่านหินลิกไนต์ ที่เหมืองแม่เมาะ ในการผลิตกระแสไฟฟ้านั้นจะใช้ถ่านหินลิกไนต์ไม่น้อยกว่าประมาณวันละ 40,000 ตัน จากจำนวนถ่านหินที่ใช้ในปริมาณที่มากแล้ว ในกระบวนการเผาไหม้จะเหลือเถ้าลอยลิกไนต์ออกมาในปริมาณ 8,000 ตัน ซึ่งในจำนวนนี้จะต้องกำจัดทิ้ง แต่ด้วย

ปริมาณที่มากทำให้ การไฟฟ้าฝ่ายผลิตต้องศึกษาถึงผลกระทบที่เกิดขึ้น และความเป็นไปได้ที่จะนำเถ้าลอยลิกไนต์กลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกครั้ง [6], [13]

ปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันมีมาก[14] ในแต่ละพื้นที่ของประเทศต่างๆไม่ว่าจะเกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม[10],[20] โรงโม่หิน[19] หรือแม้แต่โรงผสมคอนกรีตและแอสฟัลต์คอนกรีต[18] ซึ่งในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุที่สูญเสียจากกระบวนการผลิตมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างแพร่หลาย รวมไปถึงการนำวัสดุธรรมชาติ[16], [17]ที่มีในพื้นที่มาศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำมาใช้ร่วมกับการก่อสร้างต่างๆด้วย[8] และได้มีการศึกษาถึงความอันตรายที่มีต่อร่างกายมนุษย์ของฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ซึ่งจากการศึกษาของกระทรวงสาธารณสุขพบว่า เมื่อหายใจเอาฝุ่นหินหรือเถ้าลอยลิกไนต์ที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอนเป็นระยะเวลานาน และมีการสะสมของฝุ่นในปอด จนกลายเป็นโรคที่เรียกว่า โรคปอดหินได้ ดังนั้นเพื่อเป็นการนำฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์นำกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์และเหมาะสมที่สุด ในการวิจัยครั้งนี้จะใช้แอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่งเป็นตัวแทนเปรียบเทียบกับการผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์

2. วัตถุประสงค์การวิจัย

1. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมฝุ่นหิน กับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์ กับแอสฟัลต์คอนกรีตผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง
3. เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบผิวทาง สำหรับงานผิวถนนแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้ส่วนผสมของฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ ในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อขจัดปัญหามลพิษและทรัพยากรทางธรรมชาติที่นำมาใช้อย่างเหมาะสม

3. ขอบเขตของการวิจัย

เป็นการนำเถ้าลอยลิกไนต์ และฝุ่นหินมาทำการออกแบบเพื่ออัตราส่วนผสมที่เหมาะสม สามารถใช้ผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบ่งหัวข้อการวิจัยได้ดังต่อไปนี้

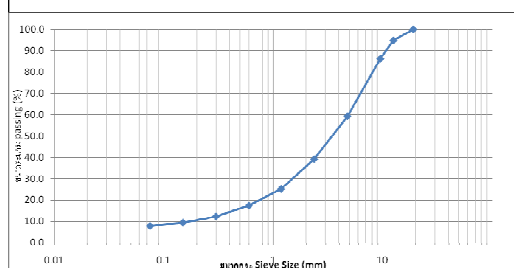
การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6

โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, 28-30 ตุลาคม 2552

1. ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของหินและฝุ่นหินที่เหลือจากกระบวนการผลิตแอสฟัลต์คอนกรีตที่นำหินมาจาก โรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา
2. ใช้เถ้าลอยลิกไนต์ที่นำมาจาก โรงไฟฟ้าแม่เมาะ จ.ลำปาง
3. ศึกษาคุณสมบัติทั่วไปของแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์
4. ปริมาณยางแอสฟัลต์ AC 60-70 ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 4, 4.5, 5, 5.5 และ 6 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม
5. ปริมาณวัสดุผสมเพิ่มได้แก่ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ ที่ใช้ในการทดลองนี้เท่ากับ 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 4 และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของส่วนผสม
6. ทำการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์ โดยเลือกใช้ปริมาณการจราจรชนิดหนาแน่นและชั้นทาง Wearing Course
7. เมื่อได้ปริมาณการผสมเพิ่มด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่หนึ่ง ฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์ที่เหมาะสมแล้ว ทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม (Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

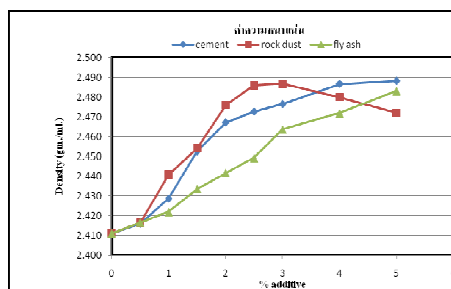
4. ผลการศึกษา

มวลรวมที่ได้นำมาจากโรงโม่หิน ต.หนองน้ำแดง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา โดยผ่านการเผาจาก โรงผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ต.โคกกรวด จ.นครราชสีมา ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ มวลรวมหยาบและมวลรวมละเอียด โดยรูปที่ 2 จะบอกถึงผลการทดสอบขนาดผลรวมที่ได้จากการร่อนผ่านตะแกรงของวัสดุมวลรวมแต่ละขนาดแล้วนำมาคำนวณออกแบบเพื่อเป็นแนวทางในการเลือกให้แอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสมตามข้อกำหนด

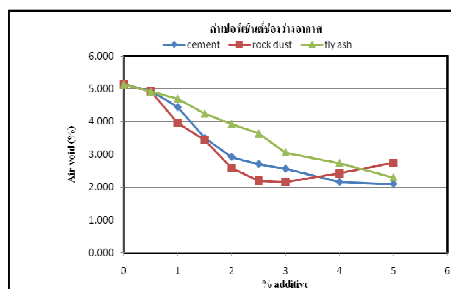


รูปที่ 2 ขนาดผลรวมสำหรับออกแบบ

จากนั้นทำการทดสอบคุณสมบัติต่างๆของวัสดุรวมตามมาตรฐานข้อกำหนดกรมทางหลวง เมื่อตรวจสอบตรงตามเกณฑ์ข้อกำหนดแล้ว จะทำการทดสอบออกแบบหาอัตราส่วนของแอสฟัลต์คอนกรีตที่เหมาะสม ซึ่งเถ้าลอยลิกไนต์ที่นำมาจากโรงไฟฟ้าแม่เมาะนั้นได้ทำการทดสอบทางคุณสมบัติทางเคมีพบว่าอยู่ในกลุ่ม Class F ตามมาตรฐาน ASTM C 618 โดยมีปริมาณ $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ มากกว่า 70% โดยน้ำหนัก ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้แอสฟัลต์ซีเมนต์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 4.8 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักมวลรวม จากนั้นทำการผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์ ฝุ่นหิน และเถ้าลอยลิกไนต์ โดยใช้เกณฑ์มาตรฐานกรมทางหลวง ชั้นทาง Wearing Course เป็นตัวกำหนดและได้ผลการเลือกอัตราส่วนผสมที่ดีที่สุดและเหมาะสมกับปริมาณที่มากของฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์อยู่ที่ 2, 2.5 และ 3 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักมวลรวม ตามลำดับ ซึ่งมีผลการทดสอบดังรูปที่ 3 ถึงรูปที่ 8



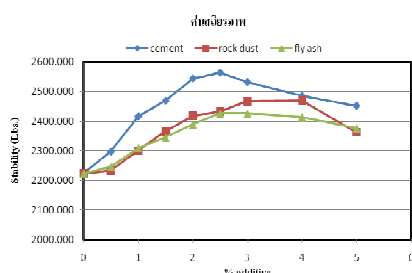
รูปที่ 3 ค่าความหนาแน่น



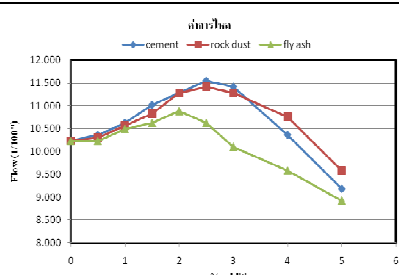
รูปที่ 4 ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศ

การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6

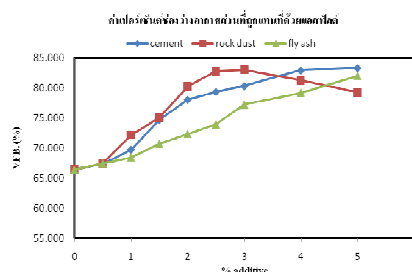
โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, 28-30 ตุลาคม 2552



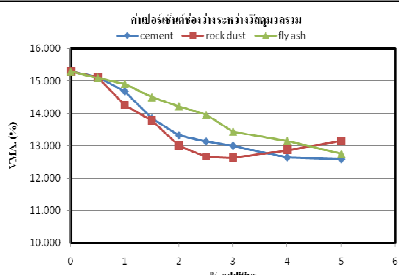
รูปที่ 5 ค่าเสถียรภาพ



รูปที่ 6 ค่าการไหล



รูปที่ 7 ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างอากาศส่วนที่ถูกแทนที่ด้วยแอสฟัลต์



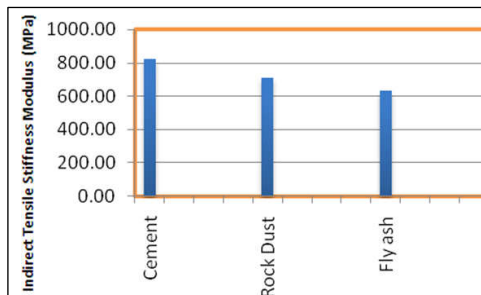
รูปที่ 8 ค่าเปอร์เซ็นต์ช่องว่างระหว่างวัสดุรวม

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบแอสฟัลต์ซีเมนต์และอัตรา

ส่วนผสม

| | AC. 4.8% | Cement | Dust Rock | Fly Ash |
|-----------------|----------|--------|-----------|---------|
| | | 2% | 2.5% | 3% |
| Density(gm/ml) | 2.418 | 2.462 | 2.479 | 2.458 |
| Air voids % | 4.8 | 3.2 | 2.4 | 3.3 |
| Stability (lbs) | 2,224 | 2,514 | 2,438 | 2,421 |
| Flow (1/100") | 10 | 11.32 | 11.2 | 10.3 |
| V.F.B. % | 68.1 | 76.9 | 81.1 | 75.9 |
| V.M.A.% | 15 | 13.5 | 12.9 | 13.7 |

จากนั้นทำการทดสอบหาค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม(Dynamic Indirect Tensile Stiffness Modulus) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสดังรูปที่ 3 โดยการทดสอบครั้งนี้ได้ทำการทดสอบที่มหาวิทยาลัยนเรศวร



รูปที่ 9 ผลการทดสอบค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อมที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

5. สรุปผลการศึกษา

จากผลการทดสอบโดยวิธีมาร์แชลล์ ทำให้พบว่าการที่นำซีเมนต์ ฟูนหิน และเถ้าลอยถิกไนต์ มาผสมเพิ่มสามารถช่วยให้ ค่าเสถียรภาพดีขึ้นเพราะด้วยวัสดุผสมเพิ่มทั้ง 3 ชนิด ที่มีขนาดละเอียดสามารถช่วยอุดประสานช่องว่างต่างๆในแอสฟัลต์คอนกรีต ให้มีค่าเสถียรภาพดีขึ้นโดยแอสฟัลต์คอนกรีตมีค่าเสถียรภาพ อยู่ที่ 2,224 ปอนด์ ราคาอยู่ที่ประมาณ 1,858.83 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนแอสฟัลต์คอนกรีตผสมซีเมนต์มีค่าเสถียรภาพ อยู่ที่ 2,514 ปอนด์ ค่า

| การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6 | โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, 28-30 ตุลาคม 2552 |
|--|--|
| <p>โมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม อยู่ที่ 824.73 MPa ราคาอยู่ที่ประมาณ 1,974.90 บาทต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนแอสฟัลต์คอนกรีตผสมฝุ่นหินมีค่าเสถียรภาพ อยู่ที่ 2,438 ปอนด์ ค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม อยู่ที่ 712.35 MPa ราคาอยู่ที่ประมาณ 1,858.83 บาทต่อลูกบาศก์เมตร และแอสฟัลต์คอนกรีตผสมเถ้าลอยลิกไนต์มีค่าเสถียรภาพ อยู่ที่ 2,421 ปอนด์ ค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม อยู่ที่ 631.98 MPa ราคาอยู่ที่ประมาณ 1,867.17 บาทต่อลูกบาศก์เมตร</p> <p>จากค่าเสถียรภาพ ค่าโมดูลัสคั้นตัวโดยวิธีแรงดึงทางอ้อม และราคาโดยประมาณนั้นจะเห็นว่าค่าใช้จ่ายที่ผสมเพิ่มด้วยซีเมนต์จะมีราคาที่สูง รองลงมาเป็นเถ้าลอยลิกไนต์ ส่วนฝุ่นหินนั้นจะมีราคาต่ำกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ไม่ได้ผสมเพิ่ม เป็นเพราะว่าฝุ่นหินไม่ต้องเสียค่าใช้จ่ายเนื่องจากมีอยู่แล้วในโรงผสม ดังนั้นการที่นำฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์มาเป็นส่วนผสมในแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น ถึงแม้ว่าค่าเสถียรภาพของการผสมเพิ่มด้วยฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์จะมีค่าน้อยกว่าการผสมเพิ่มซีเมนต์แต่สามารถช่วยปรับปรุงคุณภาพของแอสฟัลต์คอนกรีตได้และสามารถนำฝุ่นหินและเถ้าลอยลิกไนต์มาใช้ได้อย่างเหมาะสม</p> <p>เอกสารอ้างอิง</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) กรมทางหลวง, กระทรวงคมนาคม. วิธีการทดลองวัสดุก่อสร้าง เล่มที่ 1. 2530 2) กรมทางหลวง.สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. มาตรฐานงานทาง.กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, 2539. 3) กรมทางหลวง.สำนักวิเคราะห์วิจัยและพัฒนาทาง. มาตรฐานวิธีการทดลอง, 2543 .กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์องค์การรับส่งสินค้าและพัสดุภัณฑ์ 4) กรมทางหลวงสำนักทางหลวงที่8, 2547 .ส่วนตรวจสอบและวิเคราะห์ทางวิศวกรรม.คู่มือวิธีการปฏิบัติงานออกแบบและตรวจสอบผิวทางแอสฟัลต์. นครราชสีมา 5) ชินะวัฒน์ มุกตพันธุ์, 2543. การออกแบบผิวจราจร. สาขาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น 6) ชัยชาญ วรนิทัศน์ (2530). ซีเถ้าลอยสำหรับเป็นวัสดุอัดแทรกในคอนกรีตแอสฟัลต์ | <ol style="list-style-type: none"> 7) นิรชร พึ่งแดง, 2550. การทดสอบวัสดุการทาง. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น) 8) บัญชา เอกกัณหา (2539). การเปรียบเทียบเสถียรภาพของคอนกรีตแอสฟัลต์ผสมปูนขาวกับคอนกรีตแอสฟัลต์ผสมปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 9) มงคล จิรวีระเดช, 2541. คู่มือปฏิบัติการ 410 313 เทคโนโลยีคอนกรีต. สาขาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 10) ชรรยง ช่วยชู (2546). การศึกษาคุณสมบัติของมัลติเกรดแอสฟัลต์คอนกรีตโดยการเปรียบเทียบมวลรวมที่ใช้ระหว่างตะกรันเตาหลอมกับหินปูน 11) วัชรินทร์ วิทย์กุล, 2537 .วัสดุการทาง. ฟิสิกส์เซเมนต์อร์ 12) ศักดิ์ กองสุวรรณ, 2536 .เอกสารคำสอนรายวิชา 412-405 เทคโนโลยีแอสฟัลต์ติกคอนกรีต, ภาควิชาวิศวกรรมโยธา, คณะวิศวกรรมเทคโนโลยี, สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล 13) สมพงษ์ ชีไรสง (2542). การศึกษาการปรับปรุงผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตโดยใช้เถ้าลอยลิกไนต์ผสมเพิ่มในแอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด Pen. 60/70 และใช้เถ้าลอยลิกไนต์แทนมวลรวมละเอียดในแอสฟัลต์คอนกรีต 14) Abo-Qudais SA. The effects of environmental damage evaluation techniques on the prediction of environmental damage in asphalt mixtures. Building and Environment Journal, UK [submitted]. 15) American Society for Testing and Materials (ASTM). 16) Brown ER, Bassett CE. (1990). Effect of maximum aggregate size on rutting potential and other properties of asphalt aggregate mixtures 17) Burak Sengoz, Ali Topal. (2006). Minimum voids in mineral aggregate in hot-mix asphalt based on asphalt film thickness 18) M. Shahul Hameed and A. S. S. Sekar(2008). Properties of Green Concrete Containing Quarry Rock Dust and Mable Sludge Powder as fine Aggregate |

การประชุมวิชาการการขนส่งแห่งชาติครั้งที่ 6

โรงแรมท็อปแลนด์ จังหวัดพิษณุโลก, 28-30 ตุลาคม 2552

- 19) Ratnasamy Muniandy, Eltaher Elzarroug Aburkaba, Hussain Bin Hamid and Robiah BT Yunus(2009). **An Initia Investigation of the use of Local Industrial Wastes and By-Products as Mineral Fillers in Stone Mastic Asphalt Pavements**
- 20) Shaopeng Wu, Yongjie Xue, Qunshan Ye and Yongchun Chen.(2006). **Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures**

เกี่ยวกับผู้เขียน



นาย มานิตย์ เชิดขุนทร
นักศึกษาปริญญาโท
สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
E-mail : manitnut@gmail.com



ผศ.ดร.จิรยุทธ ลิมานนท์
รักษาการหัวหน้าสาขาวิชา
วิศวกรรมขนส่ง
อาจารย์สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง
สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
E-mail : tlimanond@yahoo.com

ประวัติผู้เขียน

นายมานิตย์ เชิดชูนคร เกิดเมื่อวันที่ 21 เดือน กรกฎาคม พ.ศ. 2524 ณ จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาที่โรงเรียนอนุบาลนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนราชสีมาวิทยาลัย อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน นครราชสีมา หลังจากสำเร็จการศึกษาได้เข้าทำงานที่บริษัทช่างไทยแอสฟัลต์ติกคอนกรีต ตำแหน่งวิศวกรโยธา รับผิดชอบดูแลงานด้านการก่อสร้างผิวจราจรแบบคอนกรีต และแอสฟัลต์คอนกรีต ให้กับกรมทางหลวง กรมทางหลวงชนบท และ บริษัทเอกชนทั่วไป ในปีพ.ศ. 2549 ได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมขนส่ง สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยได้รับทุนการศึกษาสำหรับผู้มีผลการเรียนดีเด่นที่สมัครเข้าศึกษาระดับบัณฑิตศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในระหว่างศึกษามีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ในการประชุมวิชาการขนส่งแห่งชาติ ครั้งที่ 6 ณ จังหวัดพิษณุโลก ระหว่างวันที่ 28 – 30 ตุลาคม พ.ศ. 2552 จำนวน 1 เรื่อง ดังแสดงในภาคผนวก ข.